

3100097008419

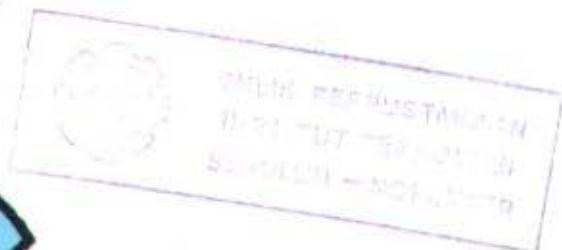
**PERANCANGAN  
KONTROLER LOGIKA FUZZY PID  
PADA  
SISTEM PENGATURAN KECEPATAN  
MOTOR ARUS SEARAH**

Oleh :

**IMRON YUATNO**

284 220 0166

RSE  
629.831.2  
Yua  
p-1  
1996



PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	10-07-96
Terima	H
No. Angkutan	6296

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA**

1996

**PERANCANGAN  
KONTROLER LOGIKA FUZZY PID  
PADA  
SISTEM PENGATURAN KECEPATAN  
MOTOR ARUS SEARAH**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan  
Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya**

**Mengetahui / Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**



**Ir. Katjuk Astrowulan, MSEE**

**NIP. 130 687 438**

**Dosen Pembimbing II**



**Dr. Ir. Muhammad Nuh, DEA**

**NIP. 131 415 674**

**SURABAYA  
MARET, 1996**

## ABSTRAK

---

Kontroler Logika Fuzzy (KLF) dengan menggunakan basis pengetahuan dan ungkapan-ungkapan linguistik dapat merepresentasikan cara kerja operator manusia. Aturan kontrol pada KLF adalah himpunan aturan-aturan kontrol linguistik yang diturunkan secara heuristik berdasarkan keadaan proses dan pengalaman operator. KLF mempunyai ide pokok yang sama dengan kontroler Proporsional Derivatif (PD). Kontroler Integrator dapat menghilangkan kesalahan keadaan tunak (error steady state).

Perancangan Kontroler Logika Fuzzy Proporsional Integral Derivatif (KLF PID) dilakukan dengan menggunakan metode yang umum digunakan. Berbagai dekomposisi KLF PID beserta perbedaannya dan analisa salah satu dekomposisi KLF PID sebagai bahan analisa yang aturan dasarnya diturunkan secara heuristik berdasarkan pengenalan terhadap obyek atur dan perilaku pengaturannya. Simulasi perancangan dengan perangkat lunak akan diterapkan pada sistem pengaturan kecepatan motor arus searah guna meniadakan kesalahan keadaan tunak dan memperbaiki respon transien.

---



# KATA PENGANTAR

---

Bismillahirrohmanirrohiim

Alhamdulillah, hanya dengan perkenan dan hidayah-Nya semata tugas akhir ini dapat terselesaikan.

Tugas akhir ini disusun guna memenuhi sebagian persyaratan dalam menyelesaikan pendidikan strata-1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, dengan bobot 6 SKS.

Judul tugas akhir ini adalah :

## SIMULASI KONTROLER LOGIKA FUZZY PID PADA SISTEM PENGATURAN KECEPATAN MOTOR ARUS SEARAH

Pada tugas akhir ini, dibahas tentang aplikasi suatu kontroler berbasis logika fuzzy, yang meliputi dasar teori, logika pengambilan keputusan dan perancangannya. Aplikasi kontroler logika fuzzy PID digunakan untuk menghilangkan kesalahan keadaan tunak yang biasa terjadi pada Kontroler logika fuzzy dan motor arus searah sebagai objek atur dari model sistem pengaturan kecepatan yang dilakukan secara simulasi komputer.

Penulis berharap semoga tugas akhir dapat bermanfaat bagi almamater tercinta, terutama rekan-rekan mahasiswa Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, bangsa dan negara.

Wassalam,

Syawal 1416 H  
Maret 1996

Penulis

## UCAPAN TERIMA KASIH

---

Ucapan terima kasih dan rasa syukur yang tak terhingga ini penulis sampaikan kepada Allah SWT semata, hanya karena kasih sayang-Nya tugas akhir ini selesai. Kepada berbagai pihak yang telah banyak membantu mulai dari proses persiapan hingga selesainya pendidikan ini, secara khusus penulis ucapkan terima kasih kepada :

1. Kakak-kakak dan keponakan-keponakan tercinta yang telah banyak memberikan dorongan moril, materil dan doa-doanya agar dapat menyelesaikan pendidikan.
2. Ir. Katjuk Astrowulan,MSEE, selaku dosen wali dan dosen pembimbing yang dengan sabar memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian tugas akhir ini maupun hal-hal diluar akademis.
3. DR. Ir. Muhamad Nuh,DEA , selaku dosen pembimbing yang memberikan bimbingan dengan segala kemudahan dan kesabaran dalam penyelesaian tugas akhir ini .
4. DR. Ir. Moch. Rameli, selaku Ketua Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan beserta Dosen-dosen yang telah banyak membantu dengan segala fasilitasnya.
5. Ir. Rusdhianto Effendi A. K.,MT, Ir Joko Susila dan Ir Son Kuswadi, yang memberikan banyak bantuan dan waktunya.
6. Warga TSP dan rekan-rekan yang telah mendahului yang banyak membantu dan memberi semangat.

Mudah-mudahan Allah SWT membalas segala kebaikan budinya. Penulis hanya dapat berdoa untuk itu, Amin.

# DAFTAR ISI

---

HALAMAN PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x

## BAB I PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG MASALAH .....	1
1.2. TUJUAN TUGAS AKHIR .....	1
1.3. BATASAN MASALAH .....	2
1.4. SISTEMATIKA PEMBAHASAN .....	2

## BAB II TEORI HIMPUNAN FUZZY

2.1. HIMPUNAN FUZZY	5
2.2. FUNGSI KEANGGOTAAN HIMPUNAN FUZZY	5
2.2.1 Definisi Bentuk Numerik .....	6
2.2.2 Definisi Bentuk Fungsi .....	6
2.3. VARIABEL LINGUISTIK	7
2.4. OPERASI DASAR HIMPUNAN FUZZY	9

## BAB III KONTROLER LOGIKA FUZZY

3.1. STRUKTUR DASAR KLF .....	11
3.2. FUZZIFIKASI .....	12
3.3. BASIS DATA .....	13
3.3.1. Kuantisasi Dan Normalisasi .....	13
3.3.2. Pembagian Ruang Masukan Dan Keluaran .....	15
3.3.3. Pemilihan Fungsi Keanggotaan .....	16



3.4. ATURAN DASAR .....	18
3.4.1. Pemilihan Variabel Masukan Dan Keluaran .....	18
3.4.2. Penurunan Aturan Kontrol Kontrol Fuzzy .....	18
3.5. LOGIKA PENGAMBILAN KEPUTUSAN .....	23
3.5.1. Aturan Kontrol Fuzzy .....	23
3.5.2. Fungsi Implikasi Fuzzy .....	24
3.5.3. Penafsiran Kata Hubung .....	25
3.5.4. Operator Komposisional .....	26
3.5.5. Mekanisme Inferensi .....	27
3.6. DEFUZZIFIKASI .....	30
3.7. KONTROLER LOGIKA FUZZY STATIS .....	32
3.7.1. Disain Kontroler Secara Verbal .....	35
3.8. KONTROLER LOGIKA FUZZY PID .....	38
3.8.1. Dekomposisi Fuzzy Pd Dan Gain Keadaan Tunak .....	39
3.8.2. Dekomposisi KLF PD Dan PI Deterministik .....	39
3.8.3. Dekomposisi KLF PD Dan Gain Fuzzy .....	40
3.8.4. Dekomposisi KLF PD Dan Fuzzy PI .....	40
3.8.5. Pseudo Fuzzy .....	42
<b>BAB IV DESAIN DAN SIMULASI MODEL</b>	
4.1. KONTROLER LOGIKA FUZZY .....	45
4.1.1. Penentuan Variabel Masukan Dan Keluaran Fuzzy .....	45
4.1.2. Strategi Pengaturan Kontroler Logika Fuzzy Pid .....	47
4.1.2.1. Basis Data .....	47
4.1.2.2. Penyusunan Aturan Dasar .....	50
4.1.2.3. Logika Pengambilan Keputusan .....	54
4.1.2.4. Defuzzifikasi .....	54
4.2. KECEPATAN MOTOR .....	56
4.2.1. Motor Servo Arus Searah .....	57
4.2.2. Motor Servo Arus Searah Pengaturan Jangkar .....	58
4.2.3. Persamaan State Motor Servo Arus Searah Pengaturan Jangkar .....	60
4.2.4. Pengukuran Parameter Motor Servo Arus Searah .....	61
4.2.5. Ketidakpastian Model Motor Arus Searah .....	64
4.3. SIMULASI .....	64

4.3.1. Model Matematik Sistem Pengaturan PID Digital .....	64
4.3.2. Perancangan Pengatur Digital .....	65
4.3.3. Diagram Alir Program Simulasi .....	66
4.4. ANALISA HASIL SIMULASI .....	68
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1. KESIMPULAN .....	70
5.2. SARAN .....	71

**DAFTAR PUSTAKA**  
**RESPON TRANSIEN**  
**USULAN TUGAS AKHIR**  
**RIWAYAT HIDUP**



## DAFTAR TABEL

---

Tabel 3.1.	Kuantisasi Dan Pendefinisian Numerik Himpunan Fuzzy .....	14
Tabel 3.2.	Normalisasi Dan Pendefinisian Fungsional Himpunan Fuzzy ..	15
Tabel 3.3.	Prototipe Aturan Kontrol Linguistik Dengan 3 Nilai .....	20
Tabel 3.4.	Penyempurnaan Aturan Kontrol Dengan 3 Nilai .....	20
Tabel 3.5.	Prototipe Aturan Kontrol Dengan 7 Nilai .....	21
Tabel 3.6.	Penyempurnaan Aturan Kontrol Dengan Nilai .....	21
Tabel 3.7.	Tabel Keputusan Aturan Kontrol Fuzzy MacVicar-Welan .....	22
Tabel 3.8.	Verbalisasi Basis Data Pada KLF .....	36
Tabel 3.9.	Verbalisasi Basis Aturan Dari Macvicar-Whelan .....	37
Tabel 3.10.	Perbedaan Kriteria Performansi Fuzzy PID .....	41
Tabel 3.11.	Ú Rule .....	43
Tabel 4.1.	Pendefinisian Bentuk Fungsi Segitiga Uniform .....	48
Tabel 4.2.a.	Tabel Keputusan MacVicar-Welan .....	51
Tabel 4.2.b.	Tabel Keputusan MacVicar-Welan .....	51
Tabel 4.3.	Metode Ziegler-Nichols .....	66
Tabel 4.4.	Respon Transien Hasil Simulasi .....	69

# BAB I

## PENDAHULUAN

---

### 1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Kontroler Logika Fuzzy (KLF) dengan menggunakan basis pengetahuan dan ungkapan-ungkapan linguistik dapat merepresentasikan cara kerja operator manusia. Kemampuan ini didasari oleh teori himpunan fuzzy yang konsepnya pertama kali dikemukakan oleh L. A. Zadeh pada tahun 1965. Aturan kontrol pada KLF adalah himpunan aturan-aturan kontrol linguistik yang diturunkan secara heuristik berdasarkan keadaan proses dan pengalaman operator.

Pelopor Aplikasi fuzzy set adalah Mamdani dan kawan-kawannya dari Queen Mary College, London, sedang penerapan KLF banyak dilakukan oleh para ahli Jepang. Aplikasi pada fuzzy set hampir tak terbatas, misalnya kontrol proses, robotika, transportasi, kedokteran, maupun ekonomi.

KLF mempunyai ide pokok yang sama dengan pengaturan Proporsional Derivatif (PD). Pada kontroler suatu plant yang tidak mempunyai integrator terdapat kesalahan keadaan tunak (error steady state) yang tidak dapat dihilangkan<sup>1)</sup>.

### 1.2 TUJUAN TUGAS AKHIR

Tugas akhir ini dititikberatkan pada peniadaan kesalahan keadaan tunak dan memperbaiki respon time yang terjadi pada KLF. Perancangan Kontrol Logika Fuzzy Proporsional Integral Derivatif (KLF PID) dilakukan dengan menggunakan metode yang umum digunakan. Aturan dasarnya diturunkan secara

---

<sup>1)</sup> Ogata, Katsuhiko, "Modern Control Engineering", Prentice Hall, hal 187

heuristik berdasarkan pengenalan terhadap obyek atur dan perilaku pengaturannya.

Simulasi perancangan dengan perangkat lunak akan diterapkan pada sistem pengaturan kecepatan motor arus searah.

### 1.3 BATASAN MASALAH

Untuk merealisasikan perancangan KLF PID dan menghindari pembahasan yang terlalu meluas pada tugas akhir ini, maka perlu diadakan pembatasan-pembatasan sebagai berikut :

1. Pembahasan teori dasar perancangan sedapat mungkin mungkin mengacu kepada metode perancangan yang akan digunakan.
2. Perancangan KLF direpresentasikan secara perangkat lunak (*software*) dan berbasis pengetahuan tanpa kemampuan belajar (*static*).
3. Metode yang digunakan untuk mendapatkan aturan-aturan kontrol fuzzy didapat dari aturan-aturan yang telah baik kinerjanya dengan modifikasi yang diperlukan.
4. *Plant* yang digunakan untuk aplikasi kontroler logika fuzzy adalah sistem pengaturan kecepatan pada motor arus searah.

### 1.4 SISTEMATIKA PEMBAHASAN

Sistematika pembahasan pada perancangan kontroler logika fuzzy yang akan digunakan pada katup pengatur ini tersusun sebagai berikut :

#### BAB I PENDAHULUAN

Bab pertama ini berisi tentang latar belakang, tujuan tugas akhir, pembatasan masalah dan sistematika pembahasan.



## **BAB II TEORI HIMPUNAN FUZZY**

Bab kedua membahas konsep KLF yang dimulai dari konsep himpunan fuzzy, fungsi keanggotaan, variabel linguistik, operasi dasar himpunan fuzzy.

## **BAB III KONTROLER LOGIKA FUZZY**

Bab ketiga menjelaskan struktur dasar KLF yang terdiri dari : fuzzifikasi, basis data, aturan dasar, logika pengambilan keputusan dan defuzzifikasi. Berbagai dekomposisi KLF PID beserta perbedaannya dan analisa salah satu KLF PID sebagai bahan analisa.

## **BAB IV DESAIN DAN SIMULASI MODEL**

Bab keempat membahas mengenai model sistem yang akan dijadikan plant beserta kontroler PID sebagai pembanding, plant yang digunakan adalah sistem pengaturan kecepatan motor Arus Searah. Hasil perancangan yang dilakukan dengan simulasi komputer dan analisa tentang data plant. Untuk mempermudah analisa, seluruh data yang diperoleh dalam bentuk grafik dan gambar yang didapatkan dari hasil simulasi.

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab penutup yang berisi kesimpulan dari tugas akhir dan saran mengenai kemungkinan pengembangan perancangan yang telah dilakukan.

## BAB II

# TEORI HIMPUNAN FUZZY

---

Fuzzy secara leksikal mengandung arti tidak jelas, samar atau kabur. Dalam teori sistem pengaturan, kata fuzzy dihubungkan dengan kata logika, sehingga didapat kata logika fuzzy yang berarti suatu logika yang samar. Dengan kata lain dengan menentukan fenomena-fenomena di alam nyata yang mengandung sifat serba tidak tepat (*inexact*) atau samar kita tentukan aturan-aturan yang samar juga.

Konsep teori fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh L.A Zadeh pada tahun 1965 yang berupa teori Himpunan Fuzzy (*fuzzy set*). Konsep himpunan fuzzy ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan metode yang merepresantasikan dan menganalisa fenomena-fenomena di alam nyata yang serba tidak tepat ditinjau dari cara berfikir manusia terhadap fenomena-fenomena itu. Cara berfikir manusia pada dasarnya tidak hanya dalam bilangan-bilangan yang pasti, tetapi merupakan penggolongan-penggolongan dengan batasan-batasan yang samar. Logika manusia dalam memandang suatu fenomena tidak hanya terdiri dari dua nilai yaitu nol dan satu, tetapi merupakan logika multi nilai yang berangsur-angsur (*gradual*) antara suatu penggolongan dengan penggolongan lainnya. Berdasarkan penggolongan tersebut ada hubungan dengan aturan yang samar dalam proses berfikir manusia dalam mengambil keputusan untuk menghadapi fenomena-fenomena itu.

Konsep teori himpunan fuzzy didasarkan pada pengelompokan elemen-elemen ke dalam kelas-kelas yang mempunyai batas tidak jelas. Kelompok-kelompok itulah yang disebut himpunan fuzzy.

## 2.1. HIMPUNAN FUZZY

Suatu himpunan fuzzy  $F$  dalam semesta  $X$  didefinisikan sebagai kumpulan pasangan elemen  $x$  dan fungsi keanggotaan  $\mu_F(x)$ . Fungsi keanggotaan  $\mu_F(x)$  mempunyai nilai dalam interval  $[0,1]$  pada tiap  $x$  dalam  $X$ . Nilai fungsi keanggotaan menunjukkan tingkat keanggotaan elemen  $x$  dalam  $F$ , bila  $\mu_F(x)=1$  menunjukkan  $x$  merupakan anggota penuh  $F$ , sedang  $\mu_F(x)=0$  menunjukkan  $x$  bukan anggota  $F$ .

Secara umum himpunan fuzzy dinotasikan sebagai

$$F = \{(x, \mu_F(x)) \mid x \in X\} \quad (2.1)$$

Bila  $x$  diskrit dengan  $n$  elemen,  $F$  dapat dinyatakan sebagai

$$F = \mu_1(x)/x_1 + \mu_2(x)/x_2 + \dots + \mu_n(x)/x_n$$

$$F = \sum_{i=1}^n \mu_F(x_i)/x_i \quad (2.2)$$

Bila  $x$  kontinyu,  $F$  dapat dinyatakan sebagai

$$F = \int_X \mu_F(x)/x \quad (2.3)$$

Dalam himpunan fuzzy  $F$ ,  $x$  disebut pendukung (support)  $F$ . Untuk elemen  $x$  di mana  $\mu_F(x) = 0,5$  disebut titik silang (cross-over). Himpunan fuzzy yang mempunyai pendukung tunggal dengan  $\mu_F(x) = 1,0$  disebut fuzzy tunggal.

## 2.2. FUNGSI KEANGGOTAAN HIMPUNAN FUZZY

Untuk menyatakan suatu fungsi keanggotaan dalam pendefinisian himpunan fuzzy tergantung pada bentuk yang akan digunakan. Secara umum ada dua metode yaitu pendefinisian secara numerik dan bentuk fungsi. Pendefinisian secara numerik diterapkan atas himpunan dengan pendukung



diskrit, sedangkan pendefinisian bentuk fungsi diterapkan pada pendukung kontinyu.

### 2.2.1. DEFINISI BENTUK NUMERIK

Fungsi keanggotaan yang didefinisikan secara numerik menggunakan pendukung diskrit. Selain itu dapat juga menggunakan nilai keanggotaan dari bentuk fungsi yaitu dengan mengambil nilai bentuk fungsi untuk tiap pendukung  $x$  yang berhingga jumlahnya. Contoh :

$$X = \{8,9,10,11,12\},$$

$$\mu_F(x) = \{0,5, 0,8, 1,0, 0,8, 0,5\},$$

maka himpunan fuzzy yang didefinisikan untuk himpunan elemen  $x$  di atas adalah :

$$F = \{0,5/8, 0,8/9, 1,0/10, 0,8/11, 0,5/12\}$$

### 2.2.2. DEFINISI BENTUK FUNGSI

Fungsi keanggotaan yang didefinisikan dalam bentuk fungsi digunakan pada pendukung kontinyu. Ada beberapa fungsi yang dapat digunakan dalam himpunan fuzzy, tetapi bentuk fungsi yang sering digunakan adalah

- Fungsi Eksponensial

$$\mu_F(x) = \exp\left(-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.4a)$$

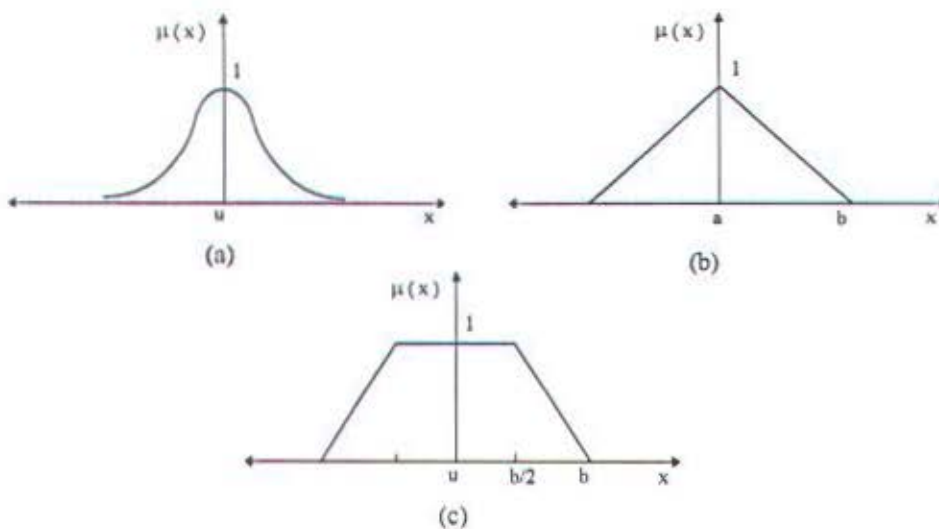
- Fungsi Segitiga

$$\mu_F(x) = 1 - \frac{\sqrt{(x-a)^2}}{b} \quad (2.4b)$$

- Fungsi Trapezium

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 1 & ; 0 \leq (x-a) \leq \frac{b}{2} \\ 2 - 2\frac{\sqrt{(x-a)^2}}{b} & ; \frac{b}{2} < (x-a) \leq b \end{cases} \quad (2.4c)$$

Gambar dari bentuk-bentuk fungsi di atas ditunjukkan oleh gambar 2.1.



Gambar 2.1. Bentuk-bentuk Fungsi Keanggotaan  
(a) Eksponensial, (b) Segitiga dan (c) Trapesium

### 2.3. VARIABEL LINGUISTIK

Pendekatan dengan himpunan fuzzy untuk mereprestasikan cara berfikir manusia memerlukan variabel linguistik sebagai ganti dari variabel numerik yang biasa digunakan dalam pendekatan kuantitatif. Variabel linguistik ini berupa ungkapan-ungkapan yang bersifat kualitatif dan berfungsi untuk menyatakan himpunan fuzzy. Dalam berfikir manusia menggunakan ungkapan yang bersifat kualitatif terhadap informasi-informasi yang diinderanya.

Ungkapan-ungkapan kualitatif ini terus menyertai proses berfikir manusia sampai diperoleh pengambilan keputusan yang diungkapkan secara kualitatif juga. Sebagai contoh, seorang operator yang tengah mengatur suatu proses secara manual akan menggunakan ungkapan-ungkapan seperti *sangat tinggi*, *agak rendah*, *sedang*, *mendekati maksimum*, *sekitar set point* dan sebagainya. Ungkapan ini mendefinisikan himpunan-himpunan fuzzy atas besaran-besaran proses yang sedang diolah dalam pikirannya.

Dalam bentuk sederhana variabel linguistik dapat dinyatakan dengan pasangan  $(u, T(u), X)$ , di mana  $u$  menunjukkan nama variabel dan  $T(u)$  adalah istilah yang menyatakan himpunan  $u$  yaitu seperangkat nama-nama nilai linguistik himpunan fuzzy atas semesta  $X$ . Sebagai contoh, misalkan variabel level akan dinyatakan dengan variabel linguistik, maka perangkat istilah  $T(\text{level})$  dapat dituliskan

$$T(\text{level}) = \{\text{rendah}, \text{sedang}\}$$

Misalkan variabel linguistik didefinisikan untuk semesta  $X = [0, 150]$ . Dalam semesta ini, *rendah* terletak di sekitar 50 mm dan *sedang* di sekitar 100 mm. Bila fungsi segitiga digunakan untuk mendefinisikan secara fungsional kedua himpunan ini maka cara menyatakannya menjadi,

$$\text{rendah} : \mu_F(x) = 1 - \frac{\sqrt{(x-50)^2}}{b}$$

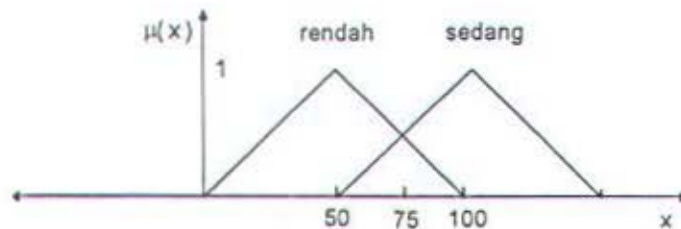
$$\text{sedang} : \mu_F(x) = 1 - \frac{\sqrt{(x-100)^2}}{b}$$

di mana  $x \in X$ . Harga  $b$  dipilih sedemikian rupa sehingga titik silang (cross-over) terletak di titik  $x = 75$  mm, yaitu pendukung dengan nilai keanggotaan  $\mu(75) = 0,5$  baik pada himpunan rendah maupun sedang. Penafsiran secara grafis semua pendefinisian ditunjukkan oleh gambar 2.2.

Gambar tersebut memberikan penafsiran bahwa nilai-nilai keanggotaan untuk suatu titik semakin besar bila titik tersebut berada disekitar titik 50 dan 100. Sebagai contoh titik 55 mempunyai nilai keanggotaan yang mendekati 1 pada himpunan *rendah*, yang berarti titik ini mempunyai nilai kebenaran yang kuat untuk menjadi anggota himpunan *rendah*, sebaliknya karena mempunyai nilai keanggotaan yang kecil pada himpunan *sedang* maka titik ini mempunyai



nilai kebenaran yang lemah untuk menjadi anggota himpunan *sedang*, sedangkan untuk titik 75 mempunyai nilai kebenaran yang sama (0,5) untuk menjadi anggota rendah maupun sedang.



Gambar 2.2. Penafsiran Grafis Variabel Lingustik

## 2.4. OPERASI DASAR HIMPUNAN FUZZY

Misal A dan B adalah himpunan fuzzy dalam semesta X dengan fungsi keanggotaan  $\mu_A(x)$  dan  $\mu_B(x)$ . Beberapa operasi dasar dari himpunan fuzzy yang sering dipergunakan adalah sebagai berikut :

1. Gabungan, fungsi keanggotaan  $\mu_C(x)$  dari gabungan  $C = A \cup B$  didefinisikan sebagai

$$\mu_C(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, x \in X \quad (2.5)$$

2. Irisan, fungsi keanggotaan  $\mu_D(x)$  dari irisan  $D = A \cap B$  didefinisikan sebagai

$$\mu_D(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, x \in X \quad (2.6)$$

3. Komplemen, fungsi keanggotaan dari komplemen A,  $\mu_{\bar{A}}(x)$  didefinisikan sebagai

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.7)$$

4. Produk Kartesian (Cartesian Product), jika  $A_1, A_2, \dots, A_n$  adalah himpunan fuzzy dalam  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , maka produk kartesian dari  $A_1, A_2, \dots, A_n$  adalah himpunan fuzzy dalam ruang produk  $X_1, X_2, \dots, X_n$  dengan fungsi

keanggotaan yang didefinisikan sebagai

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \min \{\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)\}$$

atau

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \mu_{A_1}(x_1) \cdot \mu_{A_2}(x_2) \cdot \dots \cdot \mu_{A_n}(x_n) \quad (2.8)$$

5. **Relasi Fuzzy (Fuzzy Relation)**, suatu  $n$  relasi fuzzy adalah himpunan fuzzy dalam  $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$  dan fungsi keanggotaannya dinyatakan sebagai

$$\mu_{X_1, \dots, X_n} = \{((x_1, \dots, x_n) \mu_R(x_1, \dots, x_n)) | (x_1, \dots, x_n) \in X_1 \times \dots \times X_n\} \quad (2.9)$$

6. **Komposisi Sup-Star (Sup-Star Composition)**, jika  $R$  dan  $S$  merupakan relasi fuzzy dalam  $X \times Y$  dan  $Y \times Z$ , maka komposisi  $R$  dan  $S$  adalah relasi fuzzy yang dinyatakan dengan  $R \circ S$  dan didefinisikan sebagai

$$R \circ S = \left\{ \left[ (x, z), \sup_y (\mu_R(x, y) * \mu_S(y, z)) \right], x \in X, y \in Y, z \in Y \right\} \quad (2.10)$$

di mana notasi ' $*$ ' dapat sebagai operator dalam kelas dari bentuk segitiga, minimum, produk aljabar, produk terbatas atau produk cepat.

7. **Aturan Inferensi Komposisi Sup-Star (Sup-Star Compositional Rule of Inferensi)**, jika  $R$  adalah relasi fuzzy dalam  $X \times Y$ , dan  $x$  adalah himpunan fuzzy dalam  $X$ , maka aturan inferensi komposisi sup-star menyatakan bahwa himpunan fuzzy  $y$  dalam  $Y$  diberikan oleh

$$y = x \circ R \quad (2.11)$$

di mana  $x \circ R$  adalah komposisi sup-star  $x$  dan  $R$ .

## BAB III

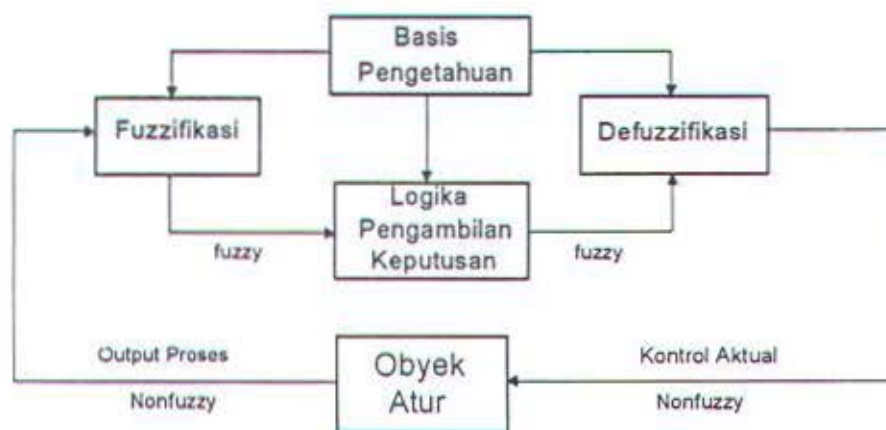
# KONTROLER LOGIKA FUZZY

Perancangan Kontroler logika Fuzzy (*Fuzzy Logic Controller*) atau KLF menggabungkan aspek pendefinisian himpunan fuzzy dengan aspek logika fuzzy untuk memperoleh suatu kontroler yang dapat merepresentasikan cara kerja operator manusia. Dengan prosedur perancangan tertentu kedua aspek diterapkan pada masukan dan keluaran untuk membentuk hasil perancangan yang berbentuk suatu algoritma aturan fuzzy.

Perancangan KLF selama ini tidak mempunyai prosedur yang baku. Hal ini disebabkan oleh fleksibilitas KLF terhadap berbagai macam plant. Namun penelitian oleh Lee C.C. dan Harris C.J., Moore C.G. dan Brown M. mengungkapkan metodologi perancangan KLF secara umum.

### 3.1. STRUKTUR DASAR KLF

Secara umum KLF mempunyai empat bagian pokok seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.1 Struktur dasar dari KLF.



Gambar 3.1. Struktur dasar KLF<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part I", IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol. 20 No. 2, Maret/April, 1990, hal 406.



Keempat bagian tersebut mempunyai fungsi sebagai berikut :

1. **Fuzzifier** berfungsi untuk mentransformasikan sinyal masukan yang bersifat crisp (bukan fuzzy) ke himpunan fuzzy dengan menggunakan operator fuzzifier.
2. **Basis Pengetahuan** berisi basis data dan aturan dasar yang mendefinisikan himpunan fuzzy atas daerah-daerah masukan dan keluaran dan menyusunnya dalam perangkat aturan kontrol.
3. **Logika Pengambil Keputusan** merupakan inti dari KLF yang mempunyai kemampuan seperti manusia dalam mengambil keputusan. Aksi atur fuzzy disimpulkan dengan menggunakan implikasi fuzzy dan mekanisme inferensi fuzzy.
4. **Defuzzifier** berfungsi untuk mentransformasikan kesimpulan tentang aksi atur yang bersifat fuzzy menjadi sinyal sebenarnya yang bersifat crisp dengan menggunakan operator defuzzifier.

### 3.2. FUZZIFIKASI

Dalam penerapan suatu sistem pengaturan, besaran masukan yang diperoleh dari plant melalui sensor akan selalu berupa crisp yang bersifat pasti dan kuantitatif, sedangkan pengolahan data dalam KLF didasarkan pada teori himpunan fuzzy yang menggunakan variabel lingusitik yang bersifat fuzzy. Oleh karenanya pada tahap awal KLF diperlukan adanya fuzzifikasi yang dilakukan oleh fuzzifier. Fuzzifikasi sekaligus dapat dikatakan sebagai pemetaan yang memetakan masukan ke semesta himpunan fuzzy. Secara simbolis pemetaan ini dinyatakan dalam

$$x = \text{fuzzifier}(x_0) \quad (3.1)$$

$x_0$  adalah masukan crisp,  $x$  adalah himpunan fuzzy dan fuzzifier merupakan operator fuzzifikasi.

Metode yang sering digunakan adalah dengan memperlakukan masukan crisp yang diperoleh sebagai suatu fuzzy tunggal (*fuzzy singleton*). Ini berarti  $x_0$  dianggap sebagai himpunan fuzzy dengan fungsi keanggotaan  $\mu(x) = 0$  kecuali pada titik  $x_0$  yang nilai keanggotaannya  $\mu(x_0) = 1$ . Secara mendasar fuzzy tunggal adalah suatu nilai yang pasti dan bersifat bukan fuzzy. Jadi jelas dalam hal ini tidak ada ke-fuzzy-an dalam data yang dihasilkan.

### 3.3. BASIS DATA

Basis data berfungsi untuk mendefinisikan himpunan-himpunan fuzzy dari sinyal masukan dan sinyal keluaran agar dapat digunakan oleh variabel linguistik dalam aturan dasar. Perancangan basis data meliputi tiga pokok, yaitu:

1. Kuantisasi dan normalisasi
2. Pembagian ruang input
3. Output dan pemilihan fungsi keanggotaan.

#### 3.3.1. Kuantisasi dan Normalisasi

Kuantisasi berarti mendiskritkan semesta pembicaraan yang kontinyu ke dalam sejumlah segmen-segmen tertentu yang disebut level kuantisasi. Pemberian nomor atau label level-level ini membentuk pendukung himpunan fuzzy secara berhingga atau semesta pembicaraan baru yang bersifat diskrit. Prosedur ini diperlukan bila pendefinisian fungsi keanggotaannya dinyatakan secara numerik. Pendefinisian ini biasanya dinyatakan dalam bentuk tabulasi, yang penerapannya berbentuk suatu tabel pandang (*look-up table*). Tabel 3.1



sebanyak 7 variabel linguistik yaitu negatif besar (NB), negatif sedang (NS), negatif kecil (NK), nol (NL), positif kecil (PK), positif sedang (PS) dan positif besar (PB).

Tabel 3.1 Kuantisasi dan Pendefinisian Numerik Himpunan Fuzzy<sup>2)</sup>

No. Level	Range	NB	NS	NK	NL	PK	PS	PB
-6	$x_0 \leq -3,2$	1,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-5	$-3,2 < x_0 \leq -1,6$	0,7	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-4	$-1,6 < x_0 \leq -0,8$	0,3	1,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
-3	$-0,8 < x_0 \leq -0,4$	0,0	0,7	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
-2	$-0,4 < x_0 \leq -0,2$	0,0	0,3	1,0	0,3	0,0	0,0	0,0
-1	$-0,2 < x_0 \leq -0,1$	0,0	0,0	0,7	0,7	0,0	0,0	0,0
0	$-0,1 < x_0 \leq +0,1$	0,0	0,0	0,3	1,0	0,3	0,0	0,0
1	$+0,1 < x_0 \leq +0,2$	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7	0,0	0,0
2	$+0,2 < x_0 \leq +0,4$	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0	0,1	0,0
3	$+0,4 < x_0 \leq +0,8$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7	0,0
4	$+0,8 < x_0 \leq +1,6$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0	0,3
5	$+1,6 < x_0 \leq +3,2$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7
6	$+3,2 \leq x_0$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,0

Pada tabel tersebut kuantisasi dilakukan atas daerah kontinyu dengan jumlah 13 level kuantisasi, sehingga diperoleh 13 pendukung yang membentuk semesta pembicaraan baru.

Pemilihan jumlah level kuantisasi (pendukung) mempengaruhi kepekaan KLF terhadap masukan dan kehalusan aksi atur pada keluaran. Semakin banyak level kuantisasi yang diterapkan pada daerah masukan dan keluaran maka semakin peka KLF tersebut dan semakin halus aksi aturnya.

Sedang normalisasi diperlukan bila diinginkan semesta pembicaraan yang terbatas pada jangkauan tertentu, misal dari -1 hingga 1. Jadi normalisasi

<sup>2)</sup> ibid, hal 409.

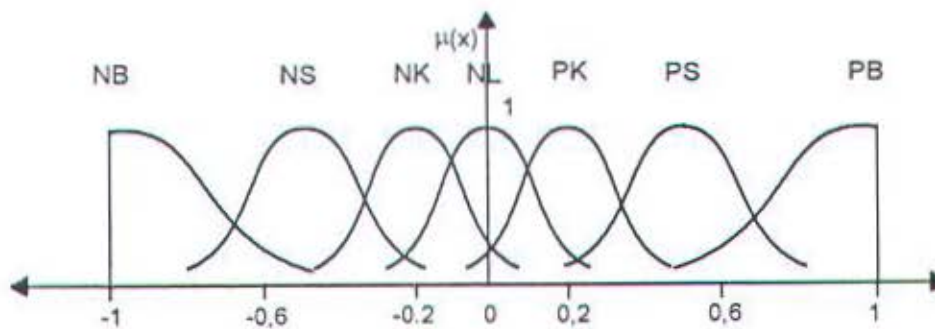


merupakan pemetaan semesta pembicaraan masukan ke semesta pembicaraan baru yang terbatas. Skala pemetaan bisa seragam (*uniform*) atau tidak seragam (*non-uniform*) tergantung kebutuhan perancangannya.

Normalisasi ini diperlukan bila fungsi keanggotaan didefinisikan secara fungsional. Tabel 3.2 menunjukkan contoh normalisasi dari semesta pembicaraan  $[-6,9,4,5]$  ke interval yang sudah dinormalisasi  $[-1,1]$  dan pendefinisian dengan fungsi  $(\mu(x) = \exp(-(x-u)^2/2\sigma^2))$ . Tafsiran grafis dari tabel 3.2 ditunjukkan oleh gambar 3.2.

Tabel 3.2 Normalisasi dan Pendefinisian Fungsional Himpunan Fuzzy

Range Segmen	Segmen Ternormalisasi	$u_r$	$\sigma_r$	Himpunan Fuzzy
$[-6,9, -4,1]$	$[-1,0, -0,5]$	-1,0	0,4	NB
$[-4,1, -2,2]$	$[-0,5, -0,2]$	-0,5	0,2	NS
$[-2,2, 0,0]$	$[-0,2, 0,0]$	-0,2	0,2	NK
$[0,0, +1,0]$	$[0,0, +0,2]$	0,0	0,2	NL
$[+1,0, +2,5]$	$[+0,2, +0,5]$	0,2	0,2	PK
$[+2,5, +4,5]$	$[+0,5, +1,0]$	0,5	0,2	PS
		1,0	0,4	PB



Gambar 3.2 Penafsiran grafis pendefinisian fungsional Tabel 3.2.

### 3.3.2. Pembagian Ruang Masukan Dan Keluaran

Pendefinisian himpunan fuzzy atas daerah masukan dan keluaran berarti pula membagi-bagi semesta pembicaraan atas nilai-nilai variabel

linguistik himpunan fuzzy. Nilai-nilai ini dinyatakan dengan seperangkat istilah linguistik seperti NB, NS, NK, NL, PK, PS, PB dan sebagainya.

Pembagian ruang masukan dan keluran ini menentukan berapa banyak jumlah himpunan fuzzy dan aturan kontrolnya yang dapat disusun. Akibatnya secara langsung jumlah himpunan menentukan kehalusan pengaturan KLF.

Contoh pada tabel 3.1 adalah pembagian ruang dengan 7 himpunan fuzzy yang fungsi keanggotaannya didefinisikan secara numerik. Sedang pada tabel 3.2 dan gambar 3.2 menunjukkan pembagian ruang dengan 7 himpunan fuzzy yang fungsi keanggotaannya didefinisikan secara fungsional.

### 3.3.3. Pemilihan Fungsi Keanggotaan

Pada pendefinisian secara numerik tingkat keanggotaan pendukung dalam himpunan fuzzy dinyatakan dalam bentuk tabulasi seperti yang dicontohkan oleh tabel 3.1. Pembagian ruang dilakukan dengan 7 nilai linguistik himpunan fuzzy yaitu : NB, NS, NK, NL, PK, PS dan PB, sedangkan fungsi keanggotaannya dinyatakan

$$\mu(x) = \sum \mu(x_i)/x_i$$

dengan  $\mu(x) = \{0.3, 0.7, 1.0, 0.7, 0.3\}$ .

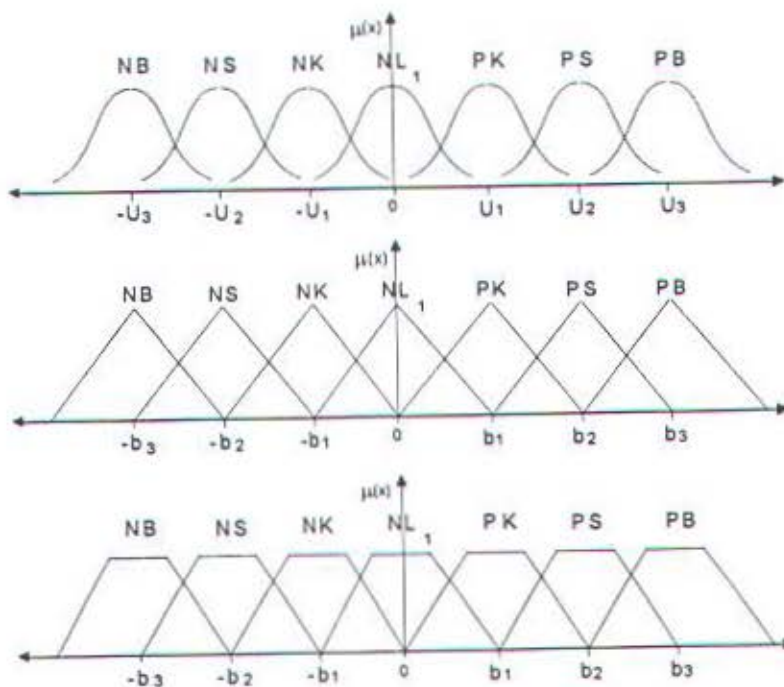
Fungsi keanggotaan dapat dipilih secara bebas dengan menentukan secara sembarang nilai keanggotaannya. Tetapi pada dasarnya penentuan ini harus tetap dapat menggambarkan karakteristik masing-masing himpunan fuzzy.

Pada pendefinisian secara fungsional tidak diperlukan pemberian nomor level kuantisasi karena dalam hal ini tidak diperlukan pendukung yang diskrit. pembagian ruangnya biasanya cukup menentukan titik sumbu simetri dan



sebaran (jangkauan) fungsi yang digunakan. Fungsi ini mudah diadaptasi terhadap keadaan semesta pembicaraan dengan cara mengatur parameter rataaan yang menentukan titik kerja dan parameter sebaran yang menentukan jangkauan kerja.

Fungsi yang sering digunakan adalah fungsi eksponen, fungsi segitiga dan fungsi trapesium seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3. Dipilihnya tiga macam fungsi itu karena mudah dimanipulasi secara matematis. Parameter rataaan ( $\mu$  dan  $a$ ) dan parameter sebaran ( $\sigma$  dan  $b$ ) dapat dipilih secara bebas, tapi tentunya dengan pertimbangan perancangan yang layak. Dalam hal parameter sebaran seragam biasanya dipilih sedemikian rupa sehingga titik silang (*cross-over*) terletak di tengah-tengah dua rataaan himpunan yang bersebelahan. Contoh penggunaan parameter rataaan seragam ditunjukkan gambar 3.3. Sedang fungsi yang tidak seragam ditunjukkan gambar 3.2.



Gambar 3.3 Fungsi-fungsi Keanggotaan uniform



### 3.4. ATURAN DASAR

Sistem fuzzy dikarakteristikan oleh istilah-istilah linguistik yang didasarkan pada pengetahuan pakar, dan biasanya berbentuk aturan jika-maka (*if-then*), yang disebut aturan kontrol fuzzy. Hal ini untuk mempermudah implementasi bentuk kondisional fuzzy. Seperangkat aturan kontrol fuzzy merupakan penjabaran dari bentuk-bentuk kondisional fuzzy dalam aturan dasar pada KLF. Perancangan perangkat aturan kontrol meliputi :

1. Pemilihan variabel masukan dan keluaran
2. Penurunan aturan kontrol kontrol fuzzy.

#### 3.4.1. Pemilihan Variabel Masukan Dan Keluaran

Pemilihan variabel masukan dan keluaran memberi pengaruh kuat pada karakteristik kontroler. Dalam hal ini pengetahuan dan pengalaman kerekayasaan memainkan peranan yang sangat penting. Pemilihan variabel ini memerlukan pemahaman tentang perilaku plant dan perilaku pengaturannya.

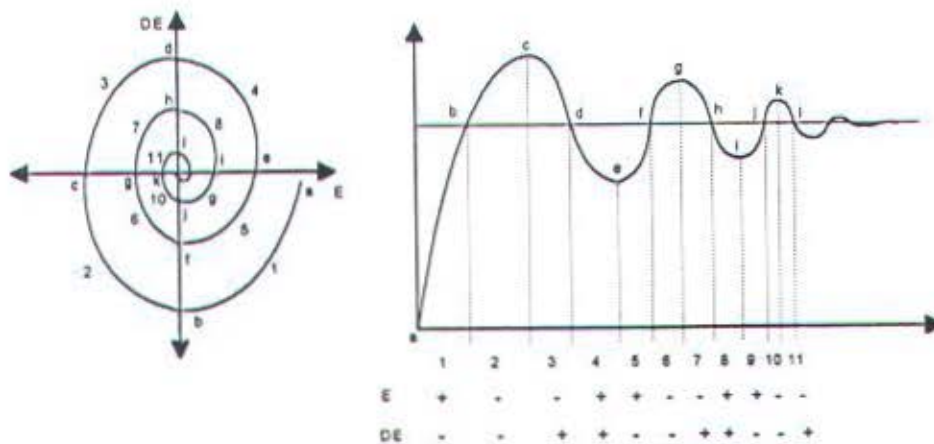
Secara umum sebagaimana kontroler konvensional, error dan perubahan error dari plant tetap menjadi acuan utama bagi aturan kontrol KLF untuk menghasilkan sinyal atur. KLF biasanya menggunakan variabel masukan berupa error dan perilaku error seperti perubahan error, turunan error, penjumlahan error, percepatan error dan sebagainya, sedangkan keluaran atau aksi aturnya berupa sinyal atur atau perubahan sinyal atur.

#### 3.4.2. Penurunan Aturan Kontrol Kontrol Fuzzy

Salah satu cara menurunkan aturan kontrol kontrol fuzzy adalah dengan mengumpulkan aturan-aturan kontrol fuzzy yang dibentuk dari analisa perilaku obyek atur secara heuristik. Aturan Kontrol diturunkan dengan jalan mengoreksi simpangan keluaran plant dari keadaan yang diinginkan. Penurunan

benar-benar dilakukan secara heuristik dengan mengandalkan pengetahuan kualitatif. Hasil yang diperoleh akan berupa prototipe aturan kontrol secara garis besar. Sehingga hasilnya masih perlu disempurnakan.

Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk menyempurnakan prototipe aturan kontrol itu. King dan Mamdani mengusulkan metode penyempurnaan aturan kontrol dengan cara yang disebut Pemetaan Skala (*Scale Mappings*). Prinsipnya adalah menentukan sinyal atur sedemikian rupa sehingga trayektori sistem loop tertutup berakhir di keadaan yang diinginkan. Dalam hal ini pengetahuan tentang perilaku peralihan plant, seperti lewatan, waktu naik dan sebagainya, serta intuisi tentang perilaku sistem tertutup diperlukan.



Gambar 3.4 Tanggapan Sistem Loop Tertutup<sup>3)</sup>

Gambar 3.4 menunjukkan tanggapan plant loop tertutup terhadap variabel masukan plant. Ada dua variabel masukan KLF yang dapat digunakan, yaitu error ( $e$ ) dan perubahan error ( $\dot{e}$ ). Untuk memperjelas trayektori dapat digunakan grafik yang menyatakan hubungan antara error ( $e$ ) dan perubahan

<sup>3)</sup> ibid, hal. 412



error ( $\dot{e}$ ), sedangkan variabel keluaran KLF berupa perubahan sinyal atur ( $\dot{u}$ ) atau sinyal atur ( $u$ ).

Pada penurunan prototipe ini pembagian ruang masukan adalah 3, yang berarti ada 3 nilai linguistik yaitu positif (P), negatif (N) dan nol (NL). Peninjauan kualitatif per titik (bertanda huruf) pada grafik memberikan penalaran yang menghasilkan prototipe aturan kontrol pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Prototipe aturan kontrol linguistik dengan 3 nilai <sup>4)</sup>

Aturan No.	$e$	$\dot{e}$	$u$	Titik Referensi
1	P	NL	P	a,e,i
2	NL	N	N	b,f,j
3	N	NL	N	c,g,k
4	NL	P	P	d,h,l
5	NL	NL	NL	set point

Sedang peninjauan secara kualitatif per daerah (bertanda angka) pada grafik tanggapan maupun pada bidang fasa menunjukkan bahwa daerah 1 mempunyai pengaruh pada pemendekan waktu naik (*rise time*), dan daerah 2 berhubungan dengan pengurangan lewatan (*overshoot*). secara heuristik penalaran ini memberikan penambahan atau penyempurnaan aturan kontrol seperti pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Penyempurnaan aturan kontrol dengan 3 Nilai <sup>5)</sup>

Aturan No.	$e$	$\dot{e}$	$u$	Titik Referensi
6	P	N	P	1(rise time),5
7	N	N	N	2(overshoot),6
8	N	P	N	3,7
9	P	P	P	4,8
10	P	N	NL	9
11	N	P	NL	10

<sup>4)</sup> ibid, hal. 413

<sup>5)</sup> ibid, hal. 413



Kinerja yang lebih baik dapat diperoleh dengan pembagian ruang yang lebih banyak, misalnya 7 nilai yaitu NB, NS, NK, NL, PK, PS dan PB. Pembagian ruang dengan 7 nilai sering digunakan pada perancangan KLF, karena pembagian ruang tersebut sudah dapat wakili ruang keseluruhan dan didapat hasil yang baik.

Tabel 3.5 Prototipe aturan kontrol Dengan 7 Nilai <sup>6)</sup>

Aturan No.	e	é	u	Titik Referensi
1	PB	NL	PB	a
2	PS	NL	PS	e
3	PK	NL	PK	i
4	NL	NB	NB	b
5	NL	NS	NS	f
6	NL	NK	NK	j
7	NB	NL	NB	c
8	NS	NL	NS	g
9	NK	NL	NK	k
10	NL	PB	PB	d
11	NL	PS	PS	h
12	NL	PK	PK	l
13	NL	NL	NL	set point

Tabel 3.6 Penyempurnaan Aturan Kontrol Dengan Nilai <sup>7)</sup>

Aturan No	e	é	u	Titik Referensi
14	PB	NK	PS	1
15	PK	NB	NS	1
16	NB	PS	NS	3
17	NS	PB	PS	3
18	PK	NK	NL	9
19	NK	PK	NL	11

Prototipe dan penyempurnaan berturut-turut ditunjukkan oleh tabel 3.5 dan tabel 3.6. Secara langsung pembagian ruang masukan mempengaruhi

<sup>6)</sup> ibid, hal. 413

<sup>7)</sup> ibid, hal. 413

jumlah aturan kontrol yang dihasilkan. Pada kasus sistem MISO, jumlah aturan kontrol yang dihasilkan adalah  $7 \times 7$  aturan kontrol.

Hasil yang didapat dari penyempurnaan aturan kontrol tersebut dapat dibuat aturan kontrol yang lengkap untuk sistem MISO. MacVicar-Whelan yang meneliti masalah penyempurnaan aturan kontrol ini menemukan pola umum hubungan antara  $e$ ,  $\dot{e}$  dan  $u$  atau  $\dot{u}$ . Penurunan secara lengkap aturan kontrol ini memberikan tabel keputusan sinyal atur yang disebut Tabel Keputusan MacVicar-Whelan. Tabel ini memberikan jumlah aturan kontrol secara maksimum. Pola ini berlaku bagi KLF yang menggunakan masukan eror dan perubahan error. Modifikasi pada tabel ini untuk memperbaiki kinerja dapat dilakukan pada batas-batas tertentu. Tabel 3.7. menunjukkan aturan kontrol fuzzy secara lengkap.

Tabel 3.7. Tabel Keputusan Aturan Kontrol Fuzzy MacVicar-Welan<sup>9)</sup>

PERUBAHAN ERROR								
		NB	NS	NK	NL	PK	PS	PB
E R R O R	NB	NB	NB	NB	NB	NS	NK	NL
	NS	NB	NB	NB	NS	NK	NL	PK
	NK	NB	NB	NS	NK	NL	PK	PS
	NL	NB	NS	NK	NL	PK	PS	PB
	PK	NS	NK	NL	PK	PS	PB	PB
	PS	NK	NL	PK	PS	PB	PB	PB
	PB	NL	PK	PS	PB	PB	PB	PB

<sup>9)</sup> Kwok L., Tang dan Robert J. Mulhaolland, "Comparing Fuzzy Logic with Classical Controller", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol. 21, No. 4, Juli/Agustus 1991, hal. 1085.



### 3.5. LOGIKA PENGAMBILAN KEPUTUSAN

Inti persoalan dari pengaturan fuzzy terletak pada logika pengambilan keputusannya yang meniru pengambilan keputusan pada manusia. Untuk memahami proses pengambilan keputusan dalam fuzzy, pada bagian ini akan dibahas beberapa konsep logika pengambilan keputusan yang meliputi fungsi-fungsi implikasi fuzzy, penafsiran kata hubung, operator komposional dan mekanisme inferensi.

#### 3.5.1. ATURAN KONTROL FUZZY

Seorang operator yang sedang bekerja secara sadar atau tidak sadar akan menggunakan aturan kontrol yang berupa hubungan *jika-maka* dalam mengambil keputusan. Aturan kontrol ini dilengkapi dengan variabel-variabel linguistik sehingga terbentuk suatu pernyataan-pernyataan linguistik yang didasarkan pada pengetahuan dan pengalaman tentang obyek atur yang akan diaturnya.

Pernyataan-pernyataan ini menggunakan variabel linguistik dari himpunan fuzzy. Bentuk umum aturan kontrol fuzzy adalah pernyataan *jika-maka* (*if-then*) dan pernyataan lengkapnya adalah :

$$\text{Jika (masukan)}_i \text{ maka (keluaran)}_j, \quad i=1,2,\dots,n, \quad j=1,2,\dots,n \quad (3.2)$$

Masukan dan keluaran merupakan himpunan fuzzy yang dinyatakan dengan variabel linguistik. Masukan merupakan keadaan dari obyek atur dan keluaran merupakan tindakan yang harus dilakukan terhadap obyek atur sehubungan dengan keadaan masukan. Dari bentuk aturan kontrol di atas aturan tersebut merupakan bentuk MIMO (*multi input multi output*). Untuk sistem MISO, maka keluaran hanya ada satu. Sistem yang akan dibahas adalah sistem MISO



dengan dua masukan dan satu keluaran yang perangkat aturan kontrolnya berbentuk :

$$\begin{aligned} R_1 &: \text{Jika } x \text{ adalah } A_1 \text{ dan } y \text{ adalah } B_1 \text{ maka } z \text{ adalah } C_1 \\ R_2 &: \text{Jika } x \text{ adalah } A_2 \text{ dan } y \text{ adalah } B_2 \text{ maka } z \text{ adalah } C_2 \\ &\vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\ R_n &: \text{Jika } x \text{ adalah } A_n \text{ dan } y \text{ adalah } B_n \text{ maka } z \text{ adalah } C_n \end{aligned}$$

di mana  $x$  dan  $y$  adalah variabel masukan dan  $z$  adalah variabel keluaran.  $A$ ,  $B$  dan  $C$  adalah nilai linguistik dari variabel  $x$ ,  $y$  dan  $z$  dalam semesta pembicaraan  $X$ ,  $Y$  dan  $Z$ .

### 3.5.2. Fungsi Implikasi Fuzzy

Aturan kontrol pada dasarnya adalah relasi fuzzy yang dinyatakan sebagai suatu hubungan sebab akibat yang disebut implikasi fuzzy. Aturan kontrol fuzzy bila dinyatakan dengan implikasi fuzzy akan menjadi :

$$\begin{aligned} \mu_{R_i} &\stackrel{\Delta}{=} \mu_{(A_i \text{ dan } B_i \rightarrow C_i)}(X, Y, Z) \\ &= [\mu_{A_i}(X) \text{ dan } \mu_{B_i}(Y)] \rightarrow \mu_{C_i}(Z) \end{aligned} \quad (3.3)$$

di mana  $A_i$  dan  $B_i$  adalah himpunan fuzzy  $A_i \times B_i$  dalam  $X \times Y$ ,  $R_i \stackrel{\Delta}{=} (A_i \text{ dan } B_i) \rightarrow C_i$  adalah implikasi fuzzy dalam  $X \times Y \times Z$ , dan notasi  $\rightarrow$  merupakan fungsi implikasi fuzzy. Bentuk fungsi implikasi ini bersesuaian dengan aturan kontrol.

Implikasi fuzzy dapat didefinisikan sebagai suatu fungsi yang disebut fungsi implikasi fuzzy. Dalam logika fuzzy banyak fungsi implikasi yang pernah diusulkan oleh para peneliti. Namun dari penelitian yang dilakukan oleh Baldwin dan Pilsworth, kemudian oleh Fukami, Mizumoto dan Tanaka diperoleh kesimpulan bahwa hanya beberapa fungsi yang layak dipilih untuk diterapkan dalam logika pengambilan keputusan pada sistem pengaturan.

Fungsi implikasi dapat didefinisikan sebagai suatu relasi yang menunjukkan keterkaitan antara suatu kejadian sebab dengan kejadian akibat. Semakin cocok hasil pembuktian matematis (secara fuzzy) suatu fungsi implikasi dengan intuisi tentang keterkaitan kejadian di atas maka semakin baik implikasi tersebut.

Salah satu fungsi implikasi yang akan dipakai disini adalah hasil penelitian Mamdani. Fungsi ini disebut fungsi implikasi aturan operasi-mini (*mini-operation rule*) yang dinotasikan dengan  $R_c$  :

$$\begin{aligned} R_c &= A \times B \\ &= \int_{X \times Y} \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) / (x, y) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Untuk sistem MISO didapat

$$\begin{aligned} R_c &= (A \times B) \times C \\ &= \int_{X \times Y \times Z} \mu_{A \times B}(x, y) \wedge \mu_C(z) / (x, y, z) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Di mana bentuk  $A \times B$  adalah produk kartesian masukan dalam  $X \times Y$ .

### 3.5.3. PENAFSIRAN KATA HUBUNG

Karena tiap-tiap aturan kontrol fuzzy dinyatakan dengan suatu relasi, maka perilaku keseluruhan sistem fuzzy ini ditentukan oleh relasi-relasi fuzzy ini. Dengan kata lain perilaku sistem fuzzy ditentukan oleh relasi tunggal yang merupakan kombinasi seluruh perangkat relasi fuzzy dalam sekumpulan aturan kontrol. Pengkombinasian ini dilakukan oleh kata hubung.

Untuk kata hubung *dan* (*and*) biasanya digunakan pada produk kartesian yang dilatarbelakangi oleh nilai yang berbeda.

Sebagai contoh adalah " Jika (A dan B) maka C", sedang kata hubung *juga* (*also*) digunakan pada fungsi implikasi fuzzy dan dapat juga sebagai gabungan dan irisan.

#### 3.5.4. OPERATOR KOMPOSISIONAL

Dalam bentuk umum, operator komposisional ditunjukkan sebagai komposisi sup-star, dengan star (\*) sebagai operator, yang dipilih untuk suatu penerapan tertentu. Ada banyak operator komposisional yang diusulkan, tetapi menurut para peneliti hanya 4 yang layak dipakai, yaitu :

- operasi sup-min (Zadeh,1973),
- operasi sup-product (Kaufman,1975),
- operasi sup-bounded-product (Mizumoto,1981),
- operasi sup-drastic-product (Mizumoto,1981).

Dalam aplikasi fuzzy, operator sup-min dan sup-product yang paling sering dipakai, bila aspek komputasi diperhitungkan. Penggunaannya bersama-sama masukan fuzzy dan fungsi implikasi memberikan persamaan komposisional berikut :

$$B' = A' \circ R$$

di mana R menunjukkan fungsi implikasi, A, sebagai masukan fuzzy dan B' adalah keluaran yang merupakan hasil penyimpulan. Sedang notasi  $\circ$  adalah operator komposisional sup-min Zadeh.

Persamaan tersebut berlaku untuk sistem SISO, sedangkan penggunaan operator komposisional untuk sistem MISO adalah :

$$C' = (A', B') \circ R$$



### 3.5.5. MEKANISME INFERENSI

Penyimpulan seperti yang dicontohkan pada operator komposisional diterapkan pada suatu aturan kontrol, sedangkan sistem pengaturan fuzzy terdiri dari seperangkat aturan kontrol. Untuk mengkombinasikan aturan kontrol tersebut digunakan kata hubung juga. Bentuk umum dari relasi kata hubung juga adalah :

masukan : x adalah  $A'$  dan y adalah  $B'$

$R_1$  : jika x adalah  $A_1$  dan y adalah  $B_1$  maka z adalah  $C_1$

juga  $R_2$  : jika x adalah  $A_2$  dan y adalah  $B_2$  maka z adalah  $C_2$

$\vdots$   $\vdots$   $\vdots$   $\vdots$

juga  $R_n$  : jika x adalah  $A_n$  dan y adalah  $B_n$  maka z adalah  $C_n$

---

Kesimpulan : z adalah  $C'$  (3.6)

Keseluruhan aturan kontrol ini harus dapat menghasilkan satu keluaran berupa kesimpulan yang dinyatakan dengan  $C'$ . Kesimpulan  $C'$  diperoleh dari mekanisme inferensi dengan komposisional sup-star yang didasarkan dari fungsi implikasi fuzzy dan kata hubung "dan" dan "juga".

Ada beberapa lemma penting yang berhubungan dengan mekanisme inferensi, lemma-lemma itu adalah

$$\text{Lemma 1: } (A', B') \circ \bigcup_{i=1}^n R_i = \bigcup_{i=1}^n (A', B') \circ R_i \quad (3.7)$$

dengan  $R_i$  adalah relasi aturan kontrol ke - i

Lemma 2: Untuk fungsi implikasi operasi-mini Mamdani diperoleh

$$1. (A', B') \circ (A_i \text{ dan } B_i \rightarrow C_i) = [A' \circ (A_i \rightarrow C_i)] \cap [B' \circ (B_i \rightarrow C_i)] \quad (3.8a)$$

$$\text{jika } \mu_{A_i \times B_i} = \mu_{A_i} \wedge \mu_{B_i}$$

$$2. (A', B') \circ (A_i \text{ dan } B_i \rightarrow C_i) = [A' \circ (A_i \rightarrow C_i)] \cdot [B' \circ (B_i \rightarrow C_i)] \quad (3.8b)$$

jika  $\mu_{A \times B_i} = \mu_{A_i} \cdot \mu_{B_i}$

Lemma 3: jika masukan berupa fuzzy tunggal  $A'=x_0$  dan  $B'=y_0$  diperoleh

$$1. R_c : \alpha_i^{\wedge} \wedge \mu_{C_i}(z), \quad \alpha_i^{\wedge} = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0) \quad (3.9a)$$

$$2. R_c : \alpha_i^* \wedge \mu_{C_i}(z), \quad \alpha_i^* = \mu_{A_i}(x_0) \cdot \mu_{B_i}(y_0) \quad (3.9b)$$

Lemma 1 menyatakan bahwa keluaran yang disimpulkan dari semua perangkat aturan kontrol sama dengan gabungan semua keluaran tiap-tiap aturan kontrol. Sedang lemma 2 dan 3 menguraikan penerapan fungsi implikasi operasi mini Mamdani ( $R_c$ ) dengan menggunakan kedua jenis produk kartesian. dari kedua lemma ini diperoleh hubungan sederhana antara masukan dan keluaran :

$$R_c : \mu_{C'} = \bigcup_{i=1}^n \alpha_i \wedge \mu_{C_i} \quad (3.10)$$

di mana faktor pembobot  $\alpha_i$  merupakan besarnya kontribusi aturan ke-i untuk aksi kontrol fuzzy. Faktor pembobot dapat ditentukan dengan dua pilihan yaitu dengan operasi minimum ( $\alpha_i^{\wedge}$ ) dan produk aljabar ( $\alpha_i^*$ ) dalam produk kartesian.

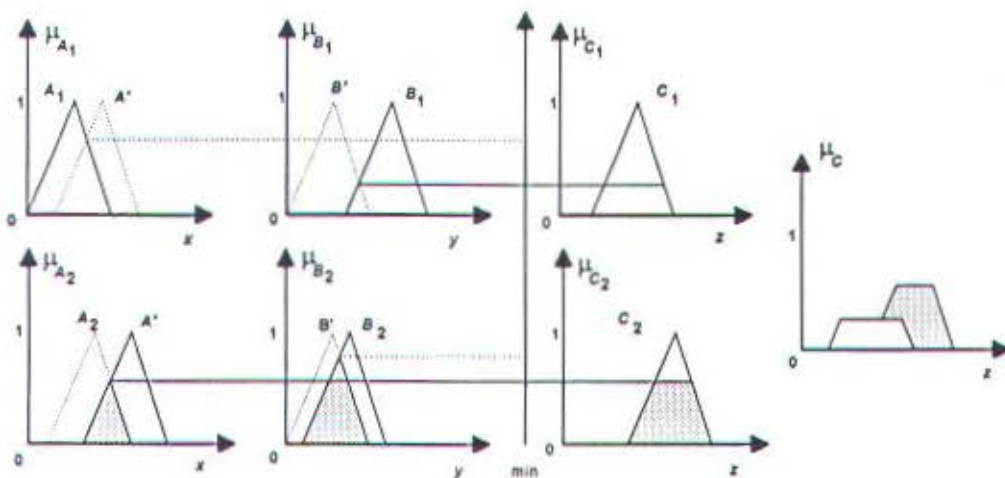
Lemma 2 mensyaratkan masukan bagi aturan kontrol yang berupa suatu himpunan fuzzy. Untuk menjelaskan hal itu, diasumsikan ada dua aturan kontrol fuzzy sebagai berikut :

$R_1$ : jika x adalah  $A_1$  dan y adalah  $B_1$  maka z adalah  $C_1$

$R_2$ : jika x adalah  $A_2$  dan y adalah  $B_2$  maka z adalah  $C_2$

yang mendapat masukan himpunan fuzzy  $A'$  dan  $B'$ . Dan penafsiran grafis dari lemma 2 untuk dua aturan kontrol fuzzy di atas yang mekanime inferensinya menggunakan operasi minimum, ditunjukkan gambar 3.4.

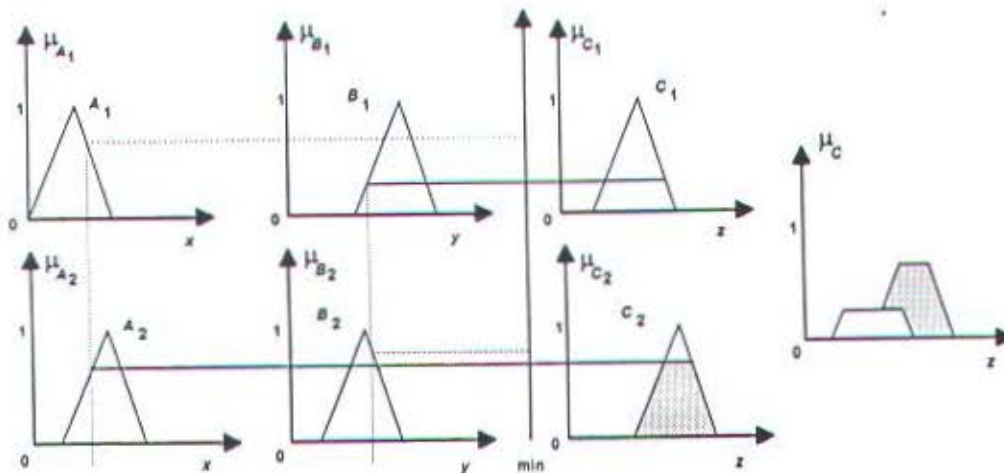
Penafsiran secara grafis lemma 2 pada gambar 3.4 menggambarkan bahwa pada mekanisme inferensi, setiap aturan kontrol mempunyai kontribusi terhadap sinyal atur yang diputuskan. Kenyataan bahwa masukan KLF diperlakukan sebagai fuzzy tunggal menyebabkan permasalahan dalam mekanisme inferensi menjadi lebih sederhana. Pada lemma 3 permasalahan tersebut diatasi, Lemma 3 menyederhanakan permasalahan dengan mengganti himpunan fuzzy dengan fuzzy tunggal. Hal ini dilakukan karena pada penerapan yang sebenarnya masukan akan bersifat crisp yang diperlakukan sebagai fuzzy tunggal. Penafsiran grafis lemma 3 pada gambar 3.5 menjelaskan hal ini.



Gambar 3.5 Penafsiran grafis lemma 2 dengan  $\alpha^{\wedge}$  dan  $R_c^{91}$

<sup>91</sup> Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part II", IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol.20 No.2, Maret/April, 1990, hal 428.



Gambar 3.6 Penafsiran grafis lemma 3<sup>101</sup>

Dari aturan kontrol  $R_1$  dan  $R_2$  dan dengan menerapkan fungsi implikasi operasi mini Mamdani ( $R_c$ ), produk cartesian operasi minimum dan penggunaan lemma 3 diperoleh faktor pembobot :

$$\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0)$$

$$\alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0)$$

Fungsi keanggotaan sinyal atur yang dihasilkan :

$$\mu_{C'}(z) = \bigcup_{i=1}^n \alpha_i \wedge \mu_{C_i}(z)$$

dengan  $C$ , himpunan fuzzy sinyal atur. Fungsi keanggotaan yang didapat dari persamaan di atas merupakan fungsi keanggotaan untuk sinyal atur tersebut. Dengan fungsi keanggotaan itu akan didapat nilai dari sinyal atur yang didapat dari proses defuzzifikasi.

### 3.6. DEFUZZIFIKASI

Pada dasarnya defuzzifikasi adalah pemetaan ruang aksi kontrol fuzzy menjadi ruang aksi kontrol non-fuzzy (crisp). Secara garis besar strategi

<sup>101</sup> ibid, hal.429

defuzzifikasi bertujuan menghasilkan aksi atur yang nyata yang dapat merepresentasikan distribusi dari aksi atur masing-masing aturan kontrol.

Bentuk umum proses defuzzifikasi adalah

$$z_0 = \text{defuzzifier}(z) \quad (3.11)$$

Ada beberapa metode defuzzifikasi yang dapat digunakan. Yang paling umum ada dua macam yaitu titik tengah maksimum (*The Mean of Maximum*) dan metoda titik pusat (*The Center of Area*).

### 1. Metoda Titik Tengah Maksimum (MOM)

Strategi MOM membangkitkan aksi kontrol dengan merepresentasikan nilai titik tengah dari semua aksi kontrol yang fungsi keanggotaannya maksimum. Untuk kasus diskrit, aksi kontrolnya ditunjukkan sebagai

$$z_0 = \sum_{j=1}^l \frac{z_j}{l} \quad (2.12)$$

di mana  $z_j$  adalah nilai pendukung dengan fungsi keanggotaan bernilai maksimum dan  $l$  adalah banyaknya nilai pendukung.

### 2. Metoda Titik Pusat (COA)

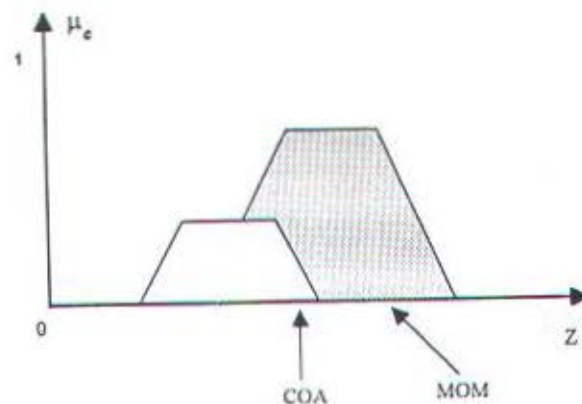
Metoda ini paling sering dipergunakan. Strategi COA dibangkitkan dari pusat berat (*the center of gravity*) pada aksi kontrol. Dalam kasus diskrit aksi kontrol ditunjukkan sebagai

$$z_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_z(w_j) \cdot w_j}{\sum_{j=1}^n \mu_z(w_j)} \quad (2.13)$$

di mana  $n$  adalah banyaknya level kuantisasi dari output.

Pada Gambar 3.8 menunjukkan interpretasi grafik dari berbagai macam strategi defuzzifikasi. Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Braee dan Rutherford, L.I. Larkin dan C.C. Lee menunjukkan hasil strategi MOM

mempunyai kinerja yang baik pada tanggapan peralihannya (*respon transient*), sedangkan hasil strategi COA mempunyai kinerja yang baik pada keadaan tunaknya (*steady state*). Dengan menggunakan keunggulan masing-masing, bila menggunakan hasil strategi MOM, kinerja KLF cocok digunakan pada sistem relay multilevel (*multilevel relay system*), sedangkan hasil strategi COA cocok dengan kontroler konvensional PI. KLF yang didasari COA umumnya mempunyai *mean square error* lebih kecil dibandingkan dengan MOM.



Gambar 3.8 Interpretasi grafik dari strategi defuzzifikasi <sup>11)</sup>

### 3.7. KONTROLER LOGIKA FUZZY STATIS

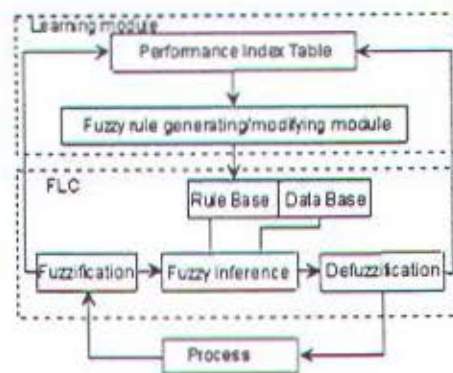
Pada kenyataannya, proses dengan sifat-sifat yang kompleks dapat dikendalikan dengan baik oleh operator hanya dengan dasar pengetahuan yang didapatkan dari pengalaman. Hal ini membangkitkan suatu gagasan untuk mendesain suatu kontroler yang beroperasi secara layaknya seorang operator ahli, yang dikenal dengan dengan istilah sistem pengaturan cerdas. Pengaturan cerdas dapat didisain berdasarkan kaidah basis pengetahuan, logika fuzzy serta kaidah jaringan syaraf tiruan.

Secara umum sistem pengaturan cerdas ini dapat dikelompokkan atas dua kelompok, yaitu sistem pengaturan yang kaidah aturnya berasal dari

<sup>11)</sup> ibid, hal. 431



pengalaman seorang ahli yang dikenal sebagai sistem pakar dan sistem pengaturan yang kaidah aturnya berasal dari evaluasi hubungan data input/output yang dikenal sebagai sistem ajar atau sistem adaptif. Demikian juga pada sistem pengaturan cerdas dengan KLF, dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu KLF statis yang setara dengan sistem pakar dan KLF swa-atur yang dapat disebut sistem ajar (*self tuning*). Struktur dasar sistem pengaturan dengan KLF swa-atur memiliki bagian sama dengan KLF. Perbedaanya terletak pada tambahan blok estimasi dan mekanisme adaptasi.



Gambar 3.9. Blok diagram KLF<sup>1</sup>

KLF statis, merupakan KLF dengan basis aturan diambil dari pengalaman seorang operator ahli. Seperti layaknya pada kontroler konvensional, kontroler ini juga dapat didesain dengan struktur Proporsional-Integral-Derivative (PID). Oleh karenanya, pada kontroler tipe ini digunakan tiga buah variabel input dengan sebuah variabel output, dimana tiap variabel didefinisikan sebagai variabel fuzzy dengan himpunan yang terpisah.

Variabel input/output yang dilibatkan dalam aksi kontroler ini, masing-masing adalah : error  $E$  sebagai variabel input yang pertama, merupakan selisih antara set-point  $R$  dengan output dari plant  $C$ ; delta error  $\dot{E}$  sebagai variabel input yang kedua, menyatakan kecepatan perubahan error ; sigma error  $\sum E$

1. Yan, Jun, " Using Fuzzy Logic", Prentice Hall, 1948, hal 68

sebagai variabel input yang ketiga, menyatakan jumlahan atau integral error, dan  $U$  merupakan variabel output dari kontroler.

Untuk mengimplementasikan KLF PID dalam bentuk pemrograman, lebih efisien jika bentuk integrasi yang menyatakan akumulasi error dihindari, atau dengan kata lain output dari kontroler semula dinyatakan sebagai perubahan  $\dot{U}$ . Demikian pula pada variabel input dari kontroler berubah menjadi variabel tanpa unsur integrasi, yaitu  $E$  menyatakan error,  $\dot{E}$  menyatakan kecepatan perubahan error dan  $\ddot{E}$  menyatakan percepatan perubahan error. Karena tiap-tiap variabel input/output tersebut menyatakan suatu variabel fuzzy, maka perlu didefinisikan pula himpunan semesta beserta fungsi keanggotaannya untuk tiap-tiap variabel fuzzy tersebut. Himpunan fuzzy tersebut adalah  $\{E^i\}$ ,  $\{\dot{E}^j\}$ ,  $\{\ddot{E}^k\}$  dan  $\{U^l\}$ , dengan  $i, j, k$  dan  $l$  masing-masing menyatakan dimensi dari variabel, merupakan himpunan referensi fuzzy dari harga linguistik yang didefinisikan pada semesta pembicaraan  $E, \dot{E}, \ddot{E}$  dan  $U$ .

Dengan menggunakan himpunan fuzzy diatas, pernyataan dasar atau basis aturan dituliskan dalam bentuk :

$$R_r: \text{If } e \text{ is } E^i \text{ AND } \dot{e} \text{ is } \dot{E}^j \text{ AND } \ddot{e} \text{ is } \ddot{E}^k \text{ THEN } U^l \quad (3.14)$$

dengan,  $r = 1, 2, \dots, N$ ;  $e \in E$ ;  $\dot{e} \in \dot{E}$  dan  $\ddot{e} \in \ddot{E}$ .

Untuk  $N$  buah basis aturan, maka relasi tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk gabungan atau kombinasi relasi seperti berikut:

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_N = \bigcup_{r=1}^N \left( E^i \times \dot{E}^j \times \ddot{E}^k \right) \quad (3.15)$$

Diasumsikan bahwa fungsi keanggotaan dari relasi  $R$  didapatkan melalui komposisi sup-t, yaitu :

$$\mu_R(e_i, \dot{e}_j, \ddot{e}_k, U_l) = \sup \left[ \mu_{E^i}^x(e_i) \wedge \mu_{\dot{E}^j}^x(\dot{e}_j) \wedge \mu_{\ddot{E}^k}^x(\ddot{e}_k) \wedge \mu_{U^l}^x(U_l) \right] \quad (3.16)$$



Dengan menggunakan aturan komposisi dari mekanisme inferensi, maka error, kecepatan error dan percepatan error sebagai input dari kontroler dapat ditransformasikan menjadi output kontroler  $u$ , yaitu :

$$U = (E \times \dot{E} \times \ddot{E}) \bullet R \quad (3.17)$$

dengan fungsi keanggotaan,

$$\mu_U(U_R) = \vee \mu_E(e_i) \wedge \mu_{\dot{E}}(\dot{e}_i) \wedge \mu_{\ddot{E}}(\ddot{e}_i) \wedge \mu_R(e_i, \dot{e}_i, \ddot{e}_i, \mu_i) \quad (3.18)$$

untuk setiap,  $e \in E; \dot{e} \in \dot{E}; \ddot{e} \in \ddot{E}$ .

Selanjutnya aksi kontroler atau output dari kontroler dapat ditentukan melalui defuzzifikasi dari hasil diatas, yaitu dengan menggunakan defuzzifikasi COA.

### 3.7.1. Disain kontroler secara verbal

Desain kontroler secara verbal atau berdasarkan pengetahuan operator ahli, biasanya dilakukan dengan melihat nilai-nilai perpotongan dari kurva output lingkaran terbuka dari plant dengan sinyal referensi unit step, yaitu pada titik seperti gambar 3.10. Melalui cara ini, diharapkan bahwa aksi kontrol yang dihasilkan pada sistem lingkaran tertutup (*close loop*) mempunyai respons dengan harga lewatan minimum dan waktu naik yang cepat. Sebagai contoh, dalam suatu disain kontroler type PD, dimisalkan output kontroler  $U$  tergantung hanya pada error  $E$  dan kecepatan error  $\dot{E}$ . Untuk tiap semesta pembicaraan didefinisikan tujuh himpunan bagian dengan ungkapan Positif Besar(PB), Positif Sedang(PS), Positif Kecil(PK), Sekitar Nol(SN), Negatif Kecil(NK), Negatif Sedang(NS), Negatif Besar(NB). Dengan melihat kurva respons dari plant dapatlah disusun suatu basis aturan dengan dasar pemikiran sebagai berikut :



\* Pada titik  $a_1(1)$ ,  $E = "PB"$  dan  $\dot{E} = "SN"$ , maka diperlukan sinyal kontrol yang besar  $U = "PB"$  agar respons dari sistem lingkaran tertutupnya segera menuju set point.

\* Pada titik  $b_1(2)$ ,  $E = "SN"$  dan  $\dot{E} = "NB"$ , maka agar lewatan yang terjadi minimum, diperlukan sinyal kontrol  $U = "NB"$ .

\* Demikian seterusnya untuk titik maksimum, minimum, dan titik potong yang lainnya, dapatlah diturunkan seperti kaidah diatas.

Dengan menggunakan kaidah diatas, dapatlah dibuat tabel aksi kontrol melalui verbalisasi respons lingkaran terbuka dari plant, yaitu seperti tabel 3.8.

Tabel 3.8. Verbalisasi basis data pada KLF

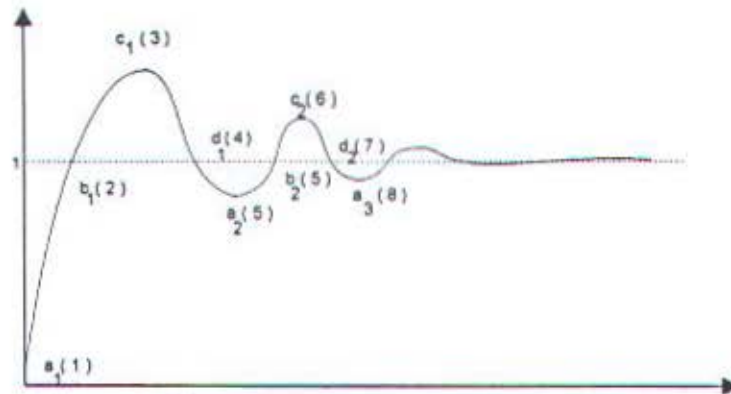
$E \backslash \dot{E}$	NB	NS	NK	SN	PK	PS	PB
NB				NB(3)			
NS				NS(7)			
NK				NK(11)			
SN	SN(2)	NS(6)	NK(10)	SN(13)	NK(12)	PS(8)	PB(4)
PK				PK(9)			
PS				PS(5)			
PB				PB(1)			

Catatan :

# isi tabel adalah aksi kontrol yang dianjurkan oleh operator ahli.

# angka didalam kurung menyatakan urutan kaidah kontrol yang diturunkan dari interpretasi titik kritis kurva respons plant terhadap input unit step, seperti gambar 3.10. Sebagai contoh, pada titik maksimum  $C_2$  (6) adalah aksi kontrol ke 6 NS(6) yang dianjurkan.

Dari tabel tersebut tampak bahwa terdapat beberapa kaidah atur yang belum terdefinisikan, yaitu hanya ada 13 kaidah atur dari 49 kaidah atur yang mungkin. Hal ini terjadi karena kurangnya informasi yang dipunyai operator dalam menurunkan kaidah atur. Akibat dari kurangnya kaidah atur ini, respons sistem dapat menjadi lambat, berisolasi ataupun lewatannya sangat besar.



gambar 3.10. Kurva output plant terhadap unit step / step.

MacVicar-Whelan yang meneliti masalah penyempurnaan kaidah atur pada kontroller type PD ini menemukan pola umum hubungan antara error  $E$ , perubahan error  $\dot{E}$ , aksi kontrol  $U$ . Penurunan lengkap dari kaidah atur ini disajikan dalam tabel verbalisasi yang disebut tabel MacVicar-Whelan, seperti tampak pada tabel 3.9. berikut :

Tabel 3.9. Verbalisasi basis aturan dari MacVicar-Whelan

$E \backslash \dot{E}$	NB	NS	NK	SN	PK	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NS	NK	SN
NS	NB	NB	NB	NS	NK	SN	PK
NK	NB	NB	NS	NK	SN	PK	PS
SN	NB	NS	NK	SN	NK	PS	PB
PK	NS	NK	SN	PK	PS	PB	PB
PS	NK	SN	PK	PS	PB	PB	PB
PB	SN	PK	PS	PB	PB	PB	PB

Tampak bahwa tabel tersebut memberikan kaidah atur lengkap, yang secara umum dapat digunakan sebagai kaidah atur untuk kontroller type PD pada



berbagai plant, terutama untuk plant orde dua yang stabil. Meskipun demikian tabel ini tidak dapat diberlakukan begitu saja untuk semua plant, khususnya plant orde tinggi dan tidak linier, dimana respons output dari plant dikehendaki mengikuti index performansi tertentu.

### 3.8. KONTROLER LOGIKA FUZZY PID

KLF PID merupakan sistem fuzzy empat dimensi yang berasal dari tiga dimensi input dan satu dimensi output. Output dari kontroler ini pada dasarnya merupakan pemetaan fuzzy nonlinear  $F: E \times \dot{E} \times \ddot{E} \Rightarrow U$ ; atau dalam formulasi variabel fuzzy  $e$ ,  $\dot{e}$ ,  $\ddot{e}$ , dan  $u$  dapat dituliskan sebagai fungsi nonlinier, yaitu :

$$U = f((e, \dot{e}, \ddot{e}) \bullet e) \quad (3.19)$$

Dalam keadaan tertentu, hubungan ini dapat pula dituliskan dalam bentuk dekomposisi :

$$U = f((e, \dot{e}, \ddot{e}) \bullet e) + f((e, \dot{e}, \ddot{e}) \bullet \dot{e}) + f((e, \dot{e}, \ddot{e}) \bullet \ddot{e}) \quad (3.20)$$

Bentuk yang terakhir ini merupakan penyajian umum dari kontroler PID dengan gain nonlinier dan biasanya berubah terhadap waktu.

Aksi kontrol dari KLF tipe PD dan PI dapat dengan mudah dibaca melalui matrik kaidah dua dimensi atau tabel kaidah atur. Dengan menggunakan cara yang sama, KLF PID dapat pula disajikan dengan matrik kaidah tiga dimensi. Akan tetapi, hal ini menjadi sulit dalam menentukan kaidah atur yang diperlukan untuk mengisi elemen-elemen dari matrik tersebut. Untuk menyederhanakan hal tersebut, KLF PID didekomposisi menjadi KLF PD yang diparalel dengan



berbagai tipe KLF lainnya, seperti gain fuzzy, integrator fuzzy, KLF PI serta kontroler konvensional PI.

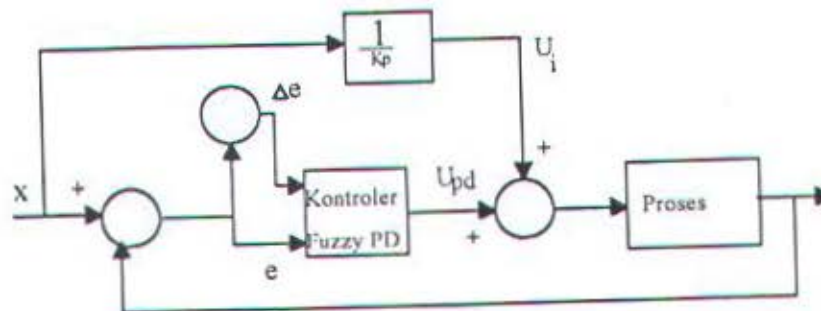
Beberapa bentuk dekomposisi dari kontroler ini adalah sebagai berikut :

### 3.8.1. dekomposisi fuzzy PD dan gain keadaan tunak

Kontroler jenis ini disebut pula sebagai KLF PID tipe pertama, dapat digunakan jika gain keadaan tunak  $K_p$  dari proses diketahui besarnya atau dapat diukur dengan mudah, sehingga aksi kontrol integral tidak diperlukan lagi. Output dari KLF PID tipe ini dapat dituliskan sebagai

$$U_{PD} = U_{PD} + \frac{x}{K_p} \quad (3.21)$$

dimana  $U_{PD}$  adalah output dari KLF PD, dan  $x$  adalah set point



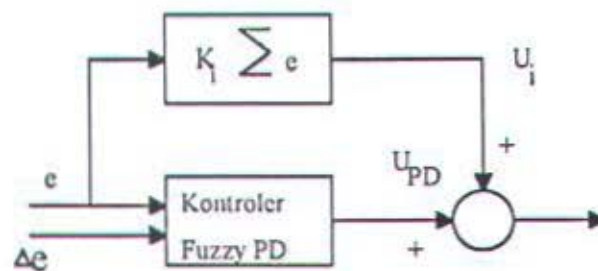
Gambar 3.11. tipe KLF PID tipe pertama

### 3.8.2. dekomposisi KLF PD dan PI deterministik

Kontroler jenis ini disebut pula sebagai KLF PID tipe kedua, digunakan jika gain keadaan tunak  $K_p$  dari proses tidak diketahui besarnya. Aksi kontrol PID ini dilakukan dengan memasang kontroler PI deterministik paralel dengan KLF PD. Output dari kontroler ini dituliskan sebagai berikut :

$$U_{PID} = U_{PD} + K_i \sum E \quad (3.22)$$

dimana  $U_{PD}$  adalah output dari KLF PD dan  $K_i$  adalah gain kontroler deterministik PI.



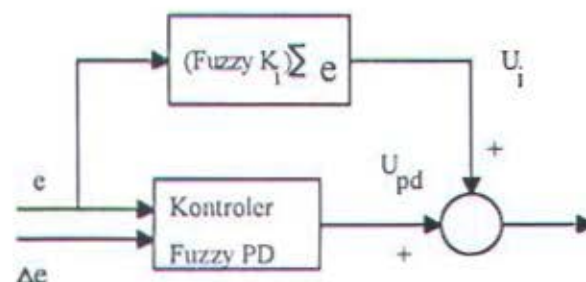
Gambar 3.12. KLF PID tipe kedua

### 3.8.3. dekomposisi KLF PD dan gain fuzzy

Kontroler jenis ini disebut pula sebagai KLF PID tipe ketiga atau type gabungan (*hybrid*), merupakan modifikasi dari kontroler tipe pertama dan tipe kedua dimana gain integrasi  $K_i$  dianggap sebagai variabel fuzzy. Output dari KLF PID tipe ini dapat dituliskan sebagai berikut :

$$U_{PID} = U_{PD} + \text{fuzzy}(K_i) \cdot \Sigma E \quad (3.23)$$

dimana  $U_{PD}$  adalah output dari KLF PD, dan Fuzzy ( $K_i$ ) adalah gain fuzzy untuk kontroler deterministik PI.



Gambar 3.13. KLF PID tipe ketiga

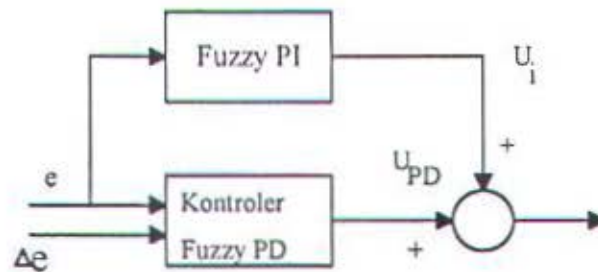
### 3.8.4. dekomposisi KLF PD dan fuzzy PI

Kontroler ini merupakan dekomposisi dari fuzzy PID menjadi fuzzy PD dan Fuzzy PI yang terpisah, disebut pula sebagai KLF PD/PI komposit atau KLF PID tipe empat. Output kontroler dapat dituliskan sebagai :

$$U_{PID} = U_{PD} + \text{fuzzy}(K_i) \cdot \Sigma E \quad (3.24)$$

dimana  $U_{PD}$  dan  $U_{PI}$  adalah output dari KLF PD dan PI. Basis aturan untuk masing-masing kontroler dapat dituliskan sebagai :

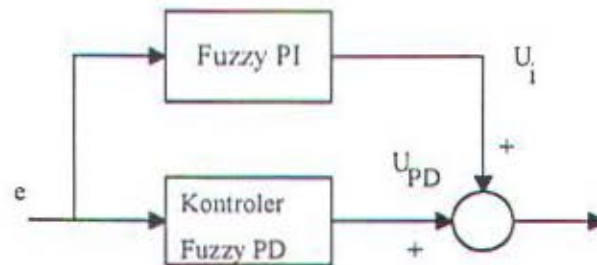
$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_r^{PD} &: \text{IF } (\dot{e} \text{ is } \dot{E}) \text{ AND } (\ddot{e} \text{ is } \ddot{E}) \text{ THEN } (\dot{u} \text{ is } \dot{u}_{PD}) \\ \mathfrak{R}_r^{PI} &: \text{IF } (e \text{ is } E') \text{ AND } (\dot{e} \text{ is } \dot{E}) \text{ THEN } (\dot{u} \text{ is } \dot{u}_{PI}) \end{aligned} \quad (3.25)$$



Gambar 3.14.KLF PID tipe keempat

Dengan menyederhanakan menjadi tiga dimensi, maka kontroler dapat dituliskan sebagai :

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_r^{PD} &: \text{IF } (\dot{e} \text{ is } \dot{E}) \text{ AND } (\ddot{e} \text{ is } \ddot{E}) \text{ THEN } (\dot{u} \text{ is } \dot{u}_{PD}) \\ \mathfrak{R}_r^{PI} &: \text{IF } (e \text{ is } E') \text{ THEN } (\dot{u} \text{ is } \dot{u}_{PI}) \end{aligned} \quad (3.26)$$



gambar 3.15. KLF PID tipe kelima



Tabel 4.2.a Tabel Keputusan MacVicar-Welan

		PERUBAHAN ERROR						
		NB	NS	NK	NL	PK	PS	PB
E R R O R	NB	NB	NB	NB	NB	NS	NK	NL
	NS	NB	NB	NB	NS	NK	NL	PK
	NK	NB	NB	NS	NK	NL	PK	PS
	NL	NB	NS	NK	NL	PK	PS	PB
	PK	NS	NK	NL	PK	PS	PB	PB
	PS	NK	NL	PK	PS	PB	PB	PB
	PB	NL	PK	PS	PB	PB	PB	PB

Tabel 4.2.b Tabel Keputusan MacVicar-Welan

U	E	NB	NS	NK	NL	PK	PS	PB
		NB	NS	NK	NL	PK	PS	PB

Bila tabel aturan dasar pada tabel 4.2.a dijabarkan dengan pernyataan linguistik fuzzy maka diperoleh seperangkat pernyataan linguistik fuzzy dengan nomor urutan sesuai nomor baris-kolom pada tabel keputusan di atas.

- $R_1$  : Jika e adalah NB dan é adalah NB maka u adalah NB  
 juga  $R_2$  : Jika e adalah NB dan é adalah NS maka u adalah NB  
 juga  $R_3$  : Jika e adalah NB dan é adalah NK maka u adalah NB  
 juga  $R_4$  : Jika e adalah NB dan é adalah NL maka u adalah NB  
 juga  $R_5$  : Jika e adalah NB dan é adalah PK maka u adalah NS  
 juga  $R_6$  : Jika e adalah NB dan é adalah PS maka u adalah NK  
 juga  $R_7$  : Jika e adalah NB dan é adalah PB maka u adalah NL  
 juga  $R_8$  : Jika e adalah NS dan é adalah NB maka u adalah NB  
 juga  $R_9$  : Jika e adalah NS dan é adalah NS maka u adalah NB  
 juga  $R_{10}$  : Jika e adalah NS dan é adalah NK maka u adalah NB  
 juga  $R_{11}$  : Jika e adalah NS dan é adalah NL maka u adalah NS  
 juga  $R_{12}$  : Jika e adalah NS dan é adalah PK maka u adalah NK

- juga  $R_{13}$  : Jika e adalah NS dan é adalah PS maka u adalah NL
- juga  $R_{14}$  : Jika e adalah NS dan é adalah PB maka u adalah PK
- juga  $R_{15}$  : Jika e adalah NK dan é adalah NB maka u adalah NB
- juga  $R_{16}$  : Jika e adalah NK dan é adalah NS maka u adalah NB
- juga  $R_{17}$  : Jika e adalah NK dan é adalah NK maka u adalah NS
- juga  $R_{18}$  : Jika e adalah NK dan é adalah NL maka u adalah NK
- juga  $R_{19}$  : Jika e adalah NK dan é adalah PK maka u adalah NL
- juga  $R_{20}$  : Jika e adalah NK dan é adalah PS maka u adalah PK
- juga  $R_{21}$  : Jika e adalah NK dan é adalah PB maka u adalah PS
- juga  $R_{22}$  : Jika e adalah NL dan é adalah NB maka u adalah NB
- juga  $R_{23}$  : Jika e adalah NL dan é adalah NS maka u adalah NS
- juga  $R_{24}$  : Jika e adalah NL dan é adalah NK maka u adalah NK
- juga  $R_{25}$  : Jika e adalah NL dan é adalah NL maka u adalah NL
- juga  $R_{26}$  : Jika e adalah NL dan é adalah PK maka u adalah PK
- juga  $R_{27}$  : Jika e adalah NL dan é adalah PS maka u adalah PS
- juga  $R_{28}$  : Jika e adalah NL dan é adalah PB maka u adalah PB
- juga  $R_{29}$  : Jika e adalah PK dan é adalah NB maka u adalah NS
- juga  $R_{30}$  : Jika e adalah PK dan é adalah NS maka u adalah NK
- juga  $R_{31}$  : Jika e adalah PK dan é adalah NK maka u adalah NL
- juga  $R_{32}$  : Jika e adalah PK dan é adalah NL maka u adalah PK
- juga  $R_{33}$  : Jika e adalah PK dan é adalah PK maka u adalah PS
- juga  $R_{34}$  : Jika e adalah PK dan é adalah PS maka u adalah PB
- juga  $R_{35}$  : Jika e adalah PK dan é adalah PB maka u adalah PB
- juga  $R_{36}$  : Jika e adalah PS dan é adalah NB maka u adalah NK



- juga  $R_{37}$  : Jika e adalah PS dan é adalah NS maka u adalah NL
- juga  $R_{38}$  : Jika e adalah PS dan é adalah NK maka u adalah PK
- juga  $R_{39}$  : Jika e adalah PS dan é adalah NL maka u adalah PS
- juga  $R_{40}$  : Jika e adalah PS dan é adalah PK maka u adalah PB
- juga  $R_{41}$  : Jika e adalah PS dan é adalah PS maka u adalah PB
- juga  $R_{42}$  : Jika e adalah PS dan é adalah PB maka u adalah PB
- atau  $R_{43}$  : Jika e adalah PB dan é adalah NB maka u adalah NL
- juga  $R_{44}$  : Jika e adalah PB dan é adalah NS maka u adalah PK
- juga  $R_{45}$  : Jika e adalah PB dan é adalah NK maka u adalah PS
- juga  $R_{46}$  : Jika e adalah PB dan é adalah NL maka u adalah PB
- juga  $R_{47}$  : Jika e adalah PB dan é adalah PK maka u adalah PB
- juga  $R_{48}$  : Jika e adalah PB dan é adalah PS maka u adalah PB
- juga  $R_{49}$  : Jika e adalah PB dan é adalah PB maka u adalah PB

Demikian pula dengan tabel 4.2.b dapat disusun rule sebagai berikut :

- $R_1$  : Jika e adalah NB maka ú adalah NB
- juga  $R_2$  : Jika e adalah NS maka ú adalah NS
- juga  $R_3$  : Jika e adalah NK maka ú adalah NK
- juga  $R_4$  : Jika e adalah NL maka ú adalah NL
- juga  $R_5$  : Jika e adalah PK maka ú adalah PK
- juga  $R_6$  : Jika e adalah PS maka ú adalah PS
- juga  $R_7$  : Jika e adalah PB maka ú adalah PB



#### 4.1.2.3 Logika Pengambilan Keputusan

Secara praktis logika pengambilan keputusan adalah suatu prosedur untuk menghitung sinyal atur berdasar basis pengetahuan (basis data dan aturan dasar) yang sudah disusun. Prosedur ini berupa operasi matematika yaitu operasi mini Mamdani terhadap pasangan masukan error dan perubahan error yang akan menghasilkan kesimpulan sinyal atur  $u_0$ .

Berdasarkan basis pengetahuan yang sudah disusun, setiap pasangan masukan error dan perubahan error akan membangkitkan 4 atau kurang dari 4 aturan dasar akan menghasilkan 4 atau kurang dari 4 sinyal atur. prosedur defuzzifikasi terhadap sinyal atur tersebut menghasilkan kesimpulan sinyal atur yang merupakan keluaran yang akan diumpankan ke kontroler.

#### 4.1.2.4 Defuzzifikasi

Untuk mengubah sinyal atur fuzzy menjadi sinyal crisp, sinyal atur dari logika pengambilan dilakukan operasi defuzzifikasi. Metode defuzzifikasi yang akan digunakan adalah metode COA.

Sebagai contoh, misalkan KLF PID mendapat masukan berupa error  $e$  yang berada dalam himpunan PK dan PS dan  $\dot{e}$  yang berada dalam himpunan NL dan PK, maka pada kedua masukan ini akan dilakukan proses sebagai berikut :

- Fuzzifikasi dan penghitungan nilai keanggotaan  $U_{PD}$  :

$$\mu_{PK}(e[k]) = 1 - (\sqrt{e[k] - 1/3 R1})^2 / b1$$

$$\mu_{PS}(e[k]) = 1 - (\sqrt{e[k] - 2/3 R1})^2 / b1$$

$$\mu_{NL}(\dot{e}[k]) = 1 - (\sqrt{\dot{e}[k]})^2 / b2$$

$$\mu_{PK}(\dot{e}[k]) = 1 - (\sqrt{\dot{e}[k] - 1/3 R2})^2 / b2$$

nilai keanggotaan di himpunan lain adalah nol.

- Operasi minimum produk kartesian pada aturan dasar yang dibangkitkan  $U_{PD}$  :

$$R_{32} : \alpha_{32} = \mu_{PK}(e) \wedge \mu_{NL}(\dot{e})$$

$$R_{33} : \alpha_{33} = \mu_{PK}(e) \wedge \mu_{PK}(\dot{e})$$

$$R_{39} : \alpha_{39} = \mu_{PS}(e) \wedge \mu_{NL}(\dot{e})$$

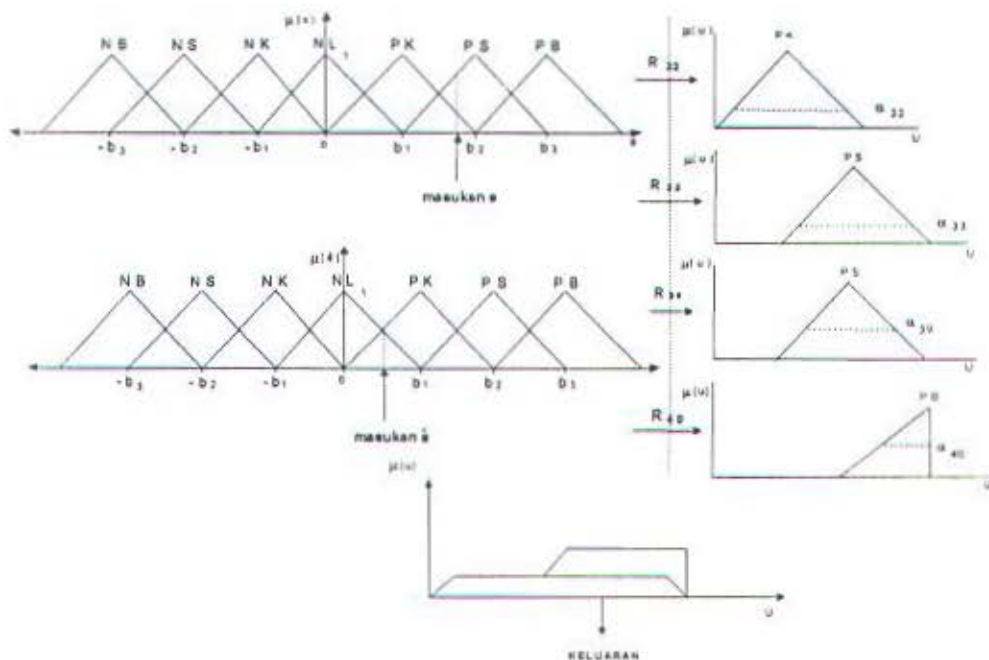
$$R_{40} : \alpha_{40} = \mu_{PS}(e) \wedge \mu_{PK}(\dot{e})$$

- Defuzzifikasi dengan metode COA

$$U_{PD} = \frac{\sum_{i=1}^{40} \alpha_i \cdot a_i}{\sum_{i=1}^{40} \alpha_i}$$

di mana  $a_i$  adalah ratahan ( $u$ ) sesuai nomor aturan dasarnya

$$U_{PD} = \frac{\alpha_{32} a_{32} + \alpha_{33} a_{33} + \alpha_{39} a_{39} + \alpha_{40} a_{40}}{\alpha_{32} + \alpha_{33} + \alpha_{39} + \alpha_{40}}$$



Gambar 4.4 Tafsiran grafis perhitungan KLF

Sehingga diperoleh  $u$  sebagai kesimpulan sinyal atur crisp yang akan diumpankan ke kontroler. Tafsiran grafis dari perhitungan KLF ditunjukkan gambar 4.4.

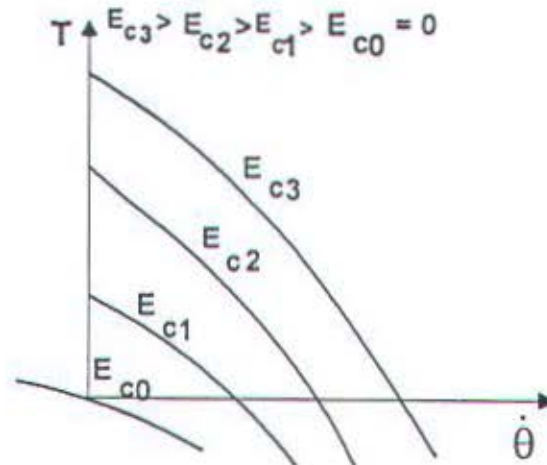
## 4.2. KECEPATAN MOTOR

Karakteristik motor servo yang penting adalah percepatan yang dapat diperoleh. Untuk suatu torsi yang bekerja, maka momen inersia motor harus minimum. Karena motor servo bekerja pada kondisi yang berubah maka selalu terjadi percepatan dan perlambatan. Motor servo harus mampu menyerap energi mekanik maupun membangkitkannya.

Untuk mendapatkan perbandingan torsi dan momen inersia yang besar, maka motor servo mempunyai rotor dengan ukuran yang panjang dan diameter yang kecil. Motor servo yang biasa digunakan untuk servo mekanis instrumen, adalah mirip dengan motor induksi dua fasa, kecuali dengan desain yang khusus.

Pada umumnya kurva-kurva torsi kecepatan sejajar untuk daerah kecepatan yang relatif lebar tetapi mungkin mempunyai jarak antara yang tidak sama, yang berarti untuk suatu kecepatan tertentu torsi tidak berubah secara linear terhadap tegangan kontrol. Meskipun demikian pada daerah kecepatan rendah, kurva-kurva torsi kecepatan biasanya berupa garis lurus dan berjarak antara yang sama pada daerah tegangan kontrol yang rendah. Karena motor servo jarang bekerja pada kecepatan yang tinggi, maka bagian linear dari kurva torsi kecepatan dapat diperluas sampai daerah kecepatan tinggi. Jika kurva-kurva torsi - kecepatan berjarak antara yang sama untuk semua tegangan kontrol, maka motor servo dapat dianggap linear.



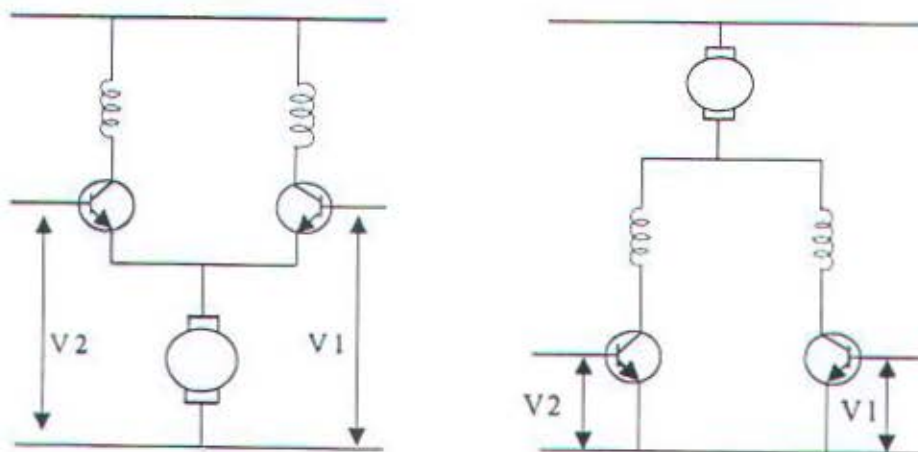


Gambar 4.5. kurva torsi terhadap kecepatan

Pada gambar 4.5. menunjukkan kurva torsi terhadap kecepatan untuk berbagai macam tegangan kontrol. Kurva torsi kecepatan untuk tegangan nol melalui titik asal. Karena kemiringan kurva ini biasanya negatif, maka jika tegangan fasa kontrol menjadi nol, motor akan membangkitkan torsi yang diperlukan untuk menghentikan putaran motor.

#### 4.2.1. MOTOR SERVO ARUS SEARAH

Motor arus searah sering digunakan dalam sistem kontrol yang memerlukan daya poros yang cukup besar. Motor arus searah jauh lebih efisien dibanding motor servo dua fasa.



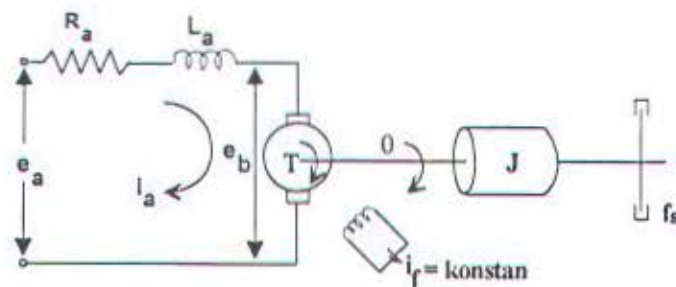
Gambar 4.6. Rangkaian Motor Servo Arus Searah

Motor servo arus searah mempunyai medan yang dieksitasi secara terpisah. Menurut pengontrolannya motor arus searah dapat dibedakan atas :

1. Motor arus searah pengaturan jangkar (medannya tetap).
2. Motor arus searah pengaturan medan (arus jangkarnya tetap).

#### 4.2.2. MOTOR SERVO ARUS SEARAH PENGATURAN JANGKAR

Motor servo arus searah dengan pengaturan jangkar adalah jenis motor arus searah yang diberi eksitasi medan tetap ( $I_f$  tetap). Model motor jenis ini dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.7. Model Motor Dc

Parameter-parameter motor arus searah pengaturan jangkar, dengan model seperti pada gambar 4.7. adalah sebagai berikut:

- $R_a$  = Tahanan belitan jangkar
- $L_a$  = Induktansi belitan jangkar
- $I_a$  = Arus belitan jangkar
- $E_a$  = Tegangan input
- $\theta$  = Perubahan sudut
- $T$  = Torsi
- $J$  = Momen inersia
- $f_s$  = Koefisien gesek

$\omega$  = Kecepatan putaran

$\psi$  = Fluksi

Torsi yang dihasilkan oleh motor besarnya sebanding dengan perkalian antara arus jangkar dengan  $\psi$ . Sedangkan fluksi sendiri besarnya sebanding dengan arus medan, atau :

$$\psi = K_f \cdot I_f \quad (4.5)$$

Jika  $K_f$  dan  $I_f$  tetap, maka torsi yang dihasilkan dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$T = K_f \cdot I_f \cdot K_t \cdot I_a \quad (4.6)$$

Dengan  $K_t$  suatu tetapan. Karena  $K_f$  dan  $I_f$  tetap, maka fluksi juga tetap. Dengan demikian akan diperoleh harga torsi yang berbanding lurus dengan arus jangkar. Persamaan (4.2) dapat ditulis sebagai berikut:

$$T = K_t \cdot I_a \quad (4.7)$$

$K_t$  adalah tetapan torsi motor. Persamaan (5.3) hanya berlaku jika motor berputar. Pada saat motor berputar akan timbul tegangan balik emf ( $E_b$ ) yang besarnya sebanding dengan kecepatan putaran motor sehingga,

$$\begin{aligned} E_b &= K_b \frac{d\theta}{dt} \\ &= K_b \omega(t) \end{aligned} \quad (4.8)$$

dengan  $K_b$  adalah tetapan tegangan balik emf. Persamaan diferensial untuk rangkaian jangkar adalah :

$$L \frac{di_a}{dt} + R_a I_a + E_b = E_s \quad (4.9)$$

Arus jangkar akan menghasilkan torsi yang akan digunakan untuk menggerakkan beban yang terdapat pada motor. Torsi dapat dinyatakan sebagai fungsi inersia dan gesekan, sehingga akan diperoleh:



$$K_t I_a = T$$

$$T = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + f_s \frac{d\theta}{dt}$$

$$K_t I_a = J \frac{d\omega}{dt} + f_s \omega \quad (4.10)$$

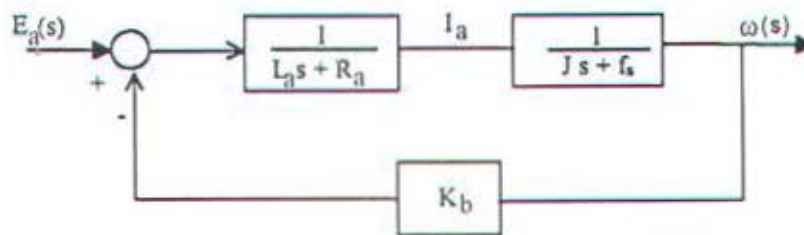
Dianggap bahwa kondisi awal dari arus jangkar dan kecepatan putaran motor sama dengan nol maka dengan menggunakan transformasi Laplace persamaan akan diperoleh persamaan-persamaan sebagai berikut:

$$K_b \omega(s) = E_b(s) \quad (4.11)$$

$$(L_a s + R_a) I_a(s) + E_b(s) = E_a(s) \quad (4.12)$$

$$(J s + f_s) \omega(s) = K_t I_a(s) \quad (4.13)$$

Jika digunakan  $E_a(s)$  sebagai input dan  $\omega(s)$  sebagai output maka dari persamaan (4.11), (4.12) dan (4.13) akan diperoleh diagram blok sebagai berikut :



Gambar 4.8. Diagram Blok Motor Servo

#### 4.2.3 PERSAMAAN STATE MOTOR SERVO ARUS SEARAH PENGATURAN JANGKAR

Persamaan-persamaan motor arus searah pada persamaan-persamaan (4.11), (4.12) dan (4.13) di atas dapat disajikan ke dalam bentuk persamaan state sebagai berikut :

$$\frac{dI_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} I_a - \frac{K_b}{L_a} \omega + \frac{E_a}{L_a} \quad (4.14)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{f_s}{J}\omega + \frac{K}{J} I_a \quad (4.15)$$

Pada sistem ini sinyal  $E_a$  digunakan sebagai input dan kecepatan putar motor  $\omega$  sebagai output. Dengan mengambil  $I_a$  dan  $\omega$  sebagai variabel keadaan maka akan diperoleh persamaan state sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} \\ \frac{K}{J} & -\frac{f_s}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} E_a$$

Dan persamaan outputnya adalah:

$$\omega = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Persamaan tersebut dapat dituliskan dalam bentuk vektor matrik sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (4.17)$$

dengan:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} \frac{dI_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} \\ x &= \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} \\ U &= E_a \end{aligned} \quad \begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} \\ \frac{K}{J} & -\frac{f_s}{J} \end{bmatrix} \\ C &= [0 \quad 1] \\ y &= \omega \end{aligned}$$

#### 4.2.4 PENGUKURAN PARAMETER MOTOR SERVO ARUS SEARAH

Pengukuran parameter-parameter pada motor servo arus searah dilakukan untuk mendapatkan model sistem dan ketidakpastian model sistem. Untuk

mengetahui harga - harga parameter ini dapat dilakukan dengan dua cara yaitu :

1. Pengukuran parameter-parameter sistem secara langsung dengan alat ukur yang sesuai.
2. Metode kotak hitam (*black box*).

Pengukuran parameter sistem secara langsung dapat dilakukan apabila struktur model atau rangkaian pengganti sistem telah diketahui. Dengan demikian model sistem dapat diketahui jika parameter telah diketahui. Sedangkan metode kotak hitam dilakukan jika struktur model dan rangkaian pengganti sistem tidak diketahui. Cara ini dilakukan dengan jalan memberi sinyal input standar pada sistem sehingga hubungan antara input dan output sistem dapat diamati.

Penentuan model sistem motor arus searah dilakukan dengan cara mengukur parameter motor arus searah secara langsung dengan alat ukur. Parameter-parameter motor servo arus searah yang membentuk model sistem adalah  $R_a$ ,  $L_a$ ,  $K_b$ ,  $K$ ,  $J$ , dan  $f_s$ .

Pengukuran parameter dilakukan dengan memperhatikan tiga penyebab ketidakpastian:

1. Ketidakpastian akibat kesalahan pengukuran.
2. Ketidakpastian akibat pengoperasian sistem.
3. Ketidakpastian akibat pembebanan.

Ketidakpastian karena kesalahan pengukuran terjadi karena keterbatasan alat ukur yang digunakan. Ketidakpastian akibat pengoperasian sistem terjadi karena berubahnya harga parameter-parameter motor ( $R_a$  dan  $L_a$ ) selama operasi. Ketidakpastian karena kesalahan pengukuran ditentukan berdasarkan



ketelitian alat ukur yang dipakai pada saat pengukuran. Sedangkan pembebanan akan menyebabkan ketidakpastian parameter koefisien gesek ( $f_s$ ). Ketidakpastian karena pengoperasian sistem akan diamati dengan mengukur parameter tersebut pada periode tertentu selama waktu operasi. Sedangkan ketidakpastian karena pembebanan akan diamati dengan cara mengukur parameter pada kondisi beban yang berbeda. Meskipun

Hasil pengukuran parameter motor adalah sebagai berikut;

$$R_s = (4,0459 \pm 0,0469) \Omega$$

$$L_s = (14,3228 \pm 0,2972) \Omega$$

$$K_b = (8,6173 \pm 0,9099) \cdot 10^{-3} \text{ V s rad}^{-1}$$

$$K = (8,6173 \pm 0,9099) \cdot 10^{-3} \text{ Nm Amp}^{-1}$$

$$J = (48,1340 \pm 2,8100) \cdot 10^{-6} \text{ Nms}^2$$

Model nominal adalah model sistem pada kondisi umum. Dengan kata lain, model nominal adalah model yang disusun dari parameter-parameter sistem tanpa adanya gangguan.

Pada sistem pengaturan kecepatan motor arus searah, yang dimaksud dengan model nominal adalah model motor pada saat beban motor pada posisi nol. Pada kondisi tersebut harga parameter  $f$  adalah:

$$f = (42,395 \pm 6,277) \cdot 10^{-6} \text{ N m s rad}^{-1}$$

Dengan mengabaikan ketidakpastian pengukuran, maka didapat matrik A dan B nominal sebagai berikut :

$$A_o = \begin{bmatrix} -282,4797 & -0,6016 \\ 179,0273 & -0,8808 \end{bmatrix}$$

$$B_o = \begin{bmatrix} 69,8188 \\ 0 \end{bmatrix}$$

#### 4.2.5. KETIDAKPASTIAN MODEL MOTOR ARUS SEARAH

Ketidakpastian model sistem terjadi karena kesalahan pengukuran parameter, berubahnya parameter akibat pengoperasian dan berubahnya parameter karena pembebanan (gangguan luar).

Ketidakpastian ini dihitung berdasarkan ketidakpastian pengukuran yang terjadi pada tiap pengukuran parameter.

### 4.3. SIMULASI

Setelah perancangan selesai, maka akan dilakukan simulasi untuk menunjukkan kemampuan KLF PID dalam melakukan proses pengaturan. Simulasi komputer ini menggunakan bahasa pemrograman Borland C++, Sebelum membahas hasil simulasi, akan dijelaskan lebih dahulu algoritma sistem pengaturan kecepatan dengan KLF PID dengan menggunakan diagram alir dari program simulasi.

#### 4.3.1. MODEL MATEMATIK SISTEM PENGATURAN PID DIGITAL

Kontroler PID digunakan sebagai pembanding dengan hasil simulasi dari KLF PID. Algoritma sistem pengaturan digital juga menggunakan aksi pengaturan yang ada pada sistem pengaturan waktu kontinyu. Aksi pengaturan PID untuk sistem waktu kontinyu dapat dituliskan sebagai berikut :

$$m(t) = K \left[ 1 + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right]$$

dengan :

$m$  = keluaran pengatur

$K$  = gain proporsional

$T_i$  = time integral (detik)

$T_d$  = time derivatif (detik)

Dalam sistem pengatur digital, algoritma tersebut dikembangkan dalam bentuk transformasi  $z$ , dengan memakai Tustin. Fungsi alih dari sistem pengatur digital dapat dituliskan sebagai :

$$G_d(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = K \left[ 1 + \frac{T}{2T_i} \frac{z+1}{z-1} + \frac{T_d}{T} \frac{z+1}{z} \right] \quad (4.18)$$

atau dapat ditulis dalam bentuk :

$$G_d(z) = \frac{K(a z^2 + b z + c)}{z(z+1)} \quad (4.19)$$

dimana :

$$a = 1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T_d}{T}$$

$$b = -1 + \frac{T}{2T_i} - \frac{T_d}{T}$$

$$c = \frac{T_d}{T}$$

dengan  $T$  adalah periode sampling.

Dengan cara sama dan bantuan software matlab maka fungsi alih sistem ( $G_d$ ) didapatkan sebagai berikut :

$$G_d(z) = \frac{3.1976 z + 0.0865}{z^2 + 0.8865z + 1}$$

#### 4.3.2. PERANCANGAN PENGATUR DIGITAL

Perancangan pengatur digital yang dimaksud disini adalah penentuan konstanta-konstanta pengatur yang meliputi gain proporsional ( $K$ ), time integral ( $T_i$ ) dan time derivatif ( $T_d$ ) yang dapat memperbaiki performansi dinamik dari sistem. Metode perancangan pengatur digital yang digunakan metode respon frekuensi Ziegler-Nichols. Metode tersebut didasarkan pada pengetahuan gain ultimate ( $K_u$ ) dan periode ultimate ( $P_u$ ). Selanjutnya konstanta-konstanta



pengatur dapat ditentukan melalui formula Ziegler- Nichols seperti yang tertera pada tabel 4.3.

Tabel 4.3. Metode Ziegler-Nichols

Kontroler	K	$T_i$	$T_d$
P	$K_u/2$	-	-
PI	$K_u/2.2$	$P_u/1.2$	-
PID	$K_u/1.7$	$P_u/2$	$P_u/8$

Untuk dapat melakukan perancangan pengatur digital dengan metode diatas maka terlebih dahulu harus dilakukan transformasi persamaan dari domain z ke w melalui transformasi bilinear :

$$w = \frac{2z-1}{Tz-1} \quad \text{atau} \quad z = \frac{1+(T/2)w}{1-(T/2)w}$$

Dengan menggunakan transformasi bilinear, maka algoritma pengatur digital PID dapat dinyatakan dalam domain w sebagai berikut :

$$G_c(w) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i w} + T_d w \right)$$

Sistem waktu diskrit biasanya dapat dinyatakan dalam domain z dalam bentuk fungsi alih sebagai berikut :

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 z^n + b_1 z^{n-1} + b_2 z^{n-2} + \dots + b_n}{z^n + a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_n} \quad (4.20)$$

atau dalam bentuk persamaan beda dapat ditulis dalam bentuk :

$$Y(k+n) + a_1 y(k+n-1) + a_2 y(k+n-2) + \dots + a_{n-1} y(k-1) + a_n y(k) = b_0 u(k+n) + b_1 u(k+n-1) + \dots + b_{n-1} u(k-1) + b_n u(k) \quad (4.21)$$

#### 4.3.3. DIAGRAM ALIR PROGRAM SIMULASI

Untuk menjelaskan program simulasi, pertama-tama akan ditunjukkan diagram alir dari menu utama.



Gambar 4.9. Diagram Alir KLF PID

Dari diagram alir menu utama, dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Sinyal masukan dalam program simulasi ini adalah tegangan.
- Penghitungan sinyal error dan perubahan error yang berfungsi sebagai variabel masukan untuk proses ini.
- Penghitungan fungsi keanggotaan dari error dan perubahan error untuk menentukan basis data yang akan digunakan.
- Penghitungan dengan menggunakan operasi minimum produk kartesian yang merupakan prosedur dalam logika pengambilan keputusan.

Tabel 3.10. Perbedaan kriteria performansi Fuzzy PID <sup>13)</sup>

		Indeks Performansi			
		Ts	Os	IAE	ITAE
tipe	1	2.09	0.009	26.54	32.59
	2	4.36	0.004	40.29	48.61
	3	7.25	0.001	58.21	82.37
	4	4.02	0.006	30.01	60.98
	5	2.21	0.007	29.91	35.73

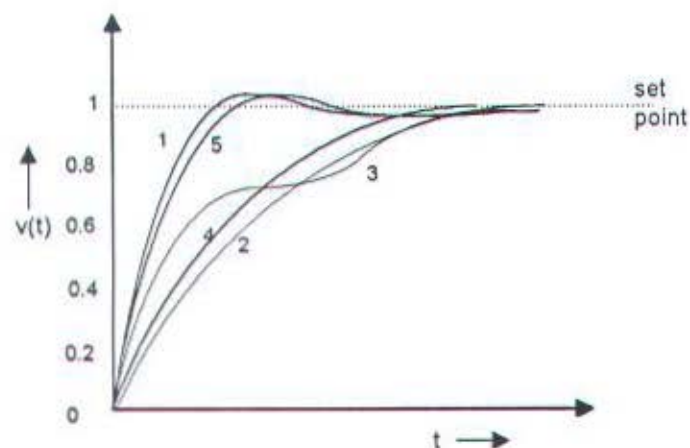
dimana :

Ts = settling time

Os = overshoot

IAE = integral absolute error

ITAE = integral time absolute error



Gambar 3.16. Berbagai respon tipe KLF PID

### 3.8.5. Pseudo Fuzzy

Dari perbandingan yang dapat dilihat dari tabel 3.10. dan gambar 3.15., KLF PID tipe pertama mempunyai rise time relatif lebih rendah dibandingkan lainnya. Tetapi pada dalam pemakaian overshoot tipe kedua merupakan yang biasa dipakai dalam kehidupan sehari-hari, 0.007, disini lain pemilihan tipe kelima adalah penggunaan fuzzy PI.

<sup>13)</sup> 2. Harris, C.J., "Intelligent Control Aspects of logic and neural nets", World Scientific, 1993



Dari persamaan 3.24. dapat dijabarkan menjadi :

$$U(k) = K_p E(k) + K_d \dot{E}(k) + K_i \Sigma E(k) \quad (3.27)$$

$$U_{pd} = K_p E(k) + K_d \dot{E}(k) \quad (3.28)$$

dimana  $U_{pd}$  didapat dari fuzzy PD (KLF) yang memakai tabel MacVicar - Melan  
sedangkan :

$$U_{pi} = K_i \Sigma E$$

$$U_i(k) = U_i(k-1) + \dot{U}_i(k)$$

maka didapat hasil akhir persamaan :

$$\dot{U}_i(k) = K_i e(k) \quad (3.29)$$

dengan cara sama seperti pada tabel KLF ,dapat disusun tabel 3.11 :

Tabel 3.11.  $\dot{U}$  rule

$\dot{U}$ \ E	NB	NM	NS	AZ	PS	PM	PB
	NB	NM	NS	AZ	PS	PM	PB

## BAB IV

### DESAIN DAN SIMULASI MODEL

---

Dalam mendesain suatu sistem kontroler, seperti yang telah diuraikan sebelumnya, dilakukan pada awal perancangan sistem adalah menentukan sistem yang akan diatur. Penentuan sistem mempunyai hubungan dengan perilaku sistem, yang meliputi tinjauan kualitatif masukan dan keluaran dan strategi pengaturannya.

Pengaturan sistem akan menentukan bentuk basis pengetahuan yang akan dipakai. Proses untuk menentukan basis pengetahuan dalam KLF PID adalah sebagai berikut :<sup>1)</sup>

1. Menggambarkan strategi yang dilakukan operator manusia dalam mengoperasikan suatu sistem pengaturan.
2. Menentukan bentuk-bentuk pengertian linguistik dalam sistem tersebut.
3. Menentukan model untuk memprediksi hasil operasi.
4. Mengkonversikan strategi linguistik operator manusia menjadi aturan dasar.

Hasil rancangan diwujudkan dalam suatu algoritma pengaturan yang di-realisasikan dalam bentuk perangkat lunak pada komputer. Untuk proses selanjutnya akan dilakukan simulasi pada sistem yang telah ditentukan. Perancangan sistem pengaturan dengan menggunakan KLF PID sebenarnya tidak memerlukan model matematis dari plant. Karena pada rancangan ini dilakukan

---

<sup>1)</sup> Michio Sugeno, "Industrial Applications of Fuzzy Control", Elsevier Science Publishing B.V., Amsterdam, 1985, hal. 6.

simulasi, maka diperlukan model matematis untuk mencari hubungan input outputnya. Guna keperluan simulasi akan digunakan suatu plant nyata yaitu motor servo arus searah dan model sistem pengaturan kecepatan yang akan dipakai pada penelitian ini ditunjukkan oleh gambar 4.1.



Gambar 4.1 Blok Diagram Model

#### 4.1. KONTROLER LOGIKA FUZZY

Pada sistem pengaturan yang ditunjukkan seperti gambar 4.1, sistem ini selalu membutuhkan umpan balik dari keluaran. Sinyal umpan balik digunakan untuk dibandingkan dengan sinyal referensi dan bertujuan untuk menghilangkan perbedaan relatif antara masukan dan keluaran. Dalam kondisi ideal, selama peralihan (*transient*) dan error masih ada, kontroler akan memberikan sinyal untuk merubah kecepatan, sampai didapat keadaan yang diinginkan. Lewatan (*overshoot*) timbul sehubungan dengan sifat lembam dari sistem.

##### 4.1.1 PENENTUAN VARIABEL MASUKAN DAN KELUARAN FUZZY

Dengan KLF PID, sistem ini diharapkan dapat mencapai keadaan tunak dalam waktu yang cepat, lewatan sekecil mungkin dan error keadaan tunak nol. Dari pengenalan terhadap perilaku sistem dapat diketahui perilaku pengaturan sebagai berikut :

- Pengaturan selalu mengacu pada error yang dihasilkan sistem,
- Sinyal atur yang diumpankan sebanding dengan errornya atau kalau diperlukan dapat diberikan penguatan tertentu.



- Peredaman sinyal atur untuk mengurangi lewatan mengacu kepada kecepatan perubahan error.
- Sinyal atur tidak perlu bersifat akumulatif (dijumlahkan) jika diasumsikan error keadaan tunak selalu nol.

Berdasarkan pengenalan terhadap perilaku pengaturan tersebut, dapat ditentukan variabel masukan KLF yang digunakan yaitu variabel error dan variabel perubahan errornya, sedangkan variabel keluaran KLF PID adalah variabel sinyal atur. Variabel-variabel masukan dan keluaran lebih lanjut didefinisikan sebagai berikut:

- error ( $e[k]$ ) adalah sinyal referensi dikurangi sinyal umpan balik :

$$e[k] = r[k] - c[k] \quad (4.1)$$

- perubahan error  $\dot{e}[k]$  adalah error sekarang dikurangi error sebelumnya, yaitu :

$$\dot{e}[k] = e[k] - e[k-1] \quad (4.2)$$

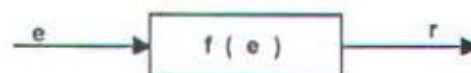
- Percepatan error  $\ddot{e}[k]$  adalah perubahan error sekarang  $\dot{e}[k]$  dikurangi perubahan error sebelumnya  $\dot{e}[k-1]$ .

$$\ddot{e}[k] = \dot{e}[k] - \dot{e}[k-1] \quad (4.3)$$

- sinyal atur  $u[k]$  adalah sinyal atur yang dihasilkan dari mekanisme inferensi KLF dan tidak ada hubungannya dengan sinyal atur sebelumnya. Jadi sinyal atur merupakan fungsi dari error.

$$R[k] = f(e) \quad (4.4)$$

Maka blok diagram dari KLF adalah



Gambar 4.2 Blok Diagram KLF PID

#### 4.1.2 STRATEGI PENGATURAN KONTROLER LOGIKA FUZZY PID

Untuk pemakaian KLF PID terdapat beberapa parameter yang menentukan kemampuan dari kontroler. Dalam bab sebelumnya telah dijelaskan secara lengkap parameter-parameter untuk perancangan KLF PID. Parameter-parameter tersebut antara lain :

- Pemilihan variabel masukan dan keluaran
- Himpunan fuzzy dan fungsi keanggotaan
- Operator inferensi dan implikasi
- Penyusunan basis data
- Operator defuzzifikasi

##### 4.1.2.1 Basis Data

Penyusunan basis data berarti mendefinisikan himpunan-himpunan fuzzy dalam daerah masukan dan keluaran. Prosedur ini ditekankan pada pembagian ruang masukan dan keluaran dengan sejumlah nilai variabel linguistik (himpunan fuzzy) yang menggunakan fungsi keanggotaan tertentu. Dalam penyusunan basis data, fungsi keanggotaan yang akan dipakai adalah bentuk fungsi segitiga seragam (*uniform*).

Langkah-langkah penyusunan basis data meliputi :

- Skala pemetaan.

Untuk fungsi seragam, kuantisasi dan normalisasi tidak diperlukan karena masukannya kontinyu dan fungsi keanggotaannya didefinisikan secara fungsional dan bersifat semetris.

- Pembagian ruang masukan dan keluaran.

Pembagian dilakukan dengan 7 variabel linguistik, yaitu negatif besar

(NB), negatif sedang (NS), negatif kecil (NK), nol (NL), positif kecil (PK), positif sedang (PS) dan positif besar (PB).

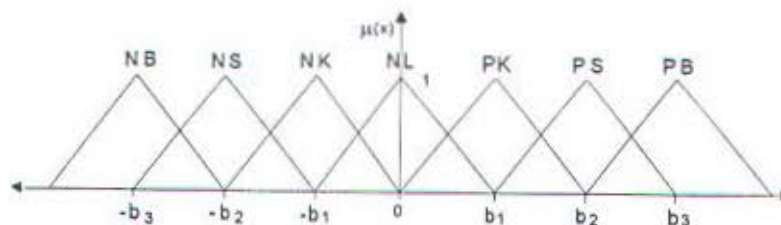
- Pemilihan fungsi keanggotaan.

Fungsi keanggotaan yang akan digunakan adalah fungsi segitiga dengan parameter yang telah ditentukan.

Berdasarkan ketentuan-ketentuan tersebut dilakukan penyusunan basis data yang hasilnya diungkapkan dalam bentuk tabel-tabel dan tafsiran grafisnya. Tabel yang ditunjukkan dibawah ini adalah tabel untuk bentuk segitiga uniform.

Tabel 4.1 Pendefinisian bentuk fungsi segitiga uniform

Range Segmen	Jangkauan	a	b	Himpunan Fuzzy
(-R, R)	(-R, -2/3 R)	-R	1/3 R	NB
	(-R, -1/3 R)	-2/3 R	1/3 R	NS
	(-2/3 R, 0)	-1/3 R	1/3 R	NK
	(-1/3 R, 1/3 R)	0	1/3 R	NL
	(0, 2/3 R)	1/3 R	1/3 R	PK
	(1/3 R, R)	2/3 R	1/3 R	PS
	(-2/3 R, R)	R	1/3 R	PB



Gambar 4.3 Penafsiran grafis tabel 4.1

Secara lebih rinci pembagian ruang masukan dan keluaran untuk menghasilkan basis data sebagai berikut :

#### 1. Error (e[k])

$$\mu_{NB}(e[k]) = 1 - (\sqrt{e[k] + R1})^2 / b1$$



$$\mu_{NS}(e[k]) = 1 - (\sqrt{e[k] + 2/3 R1})^2 / b1$$

$$\mu_{NK}(e[k]) = 1 - (\sqrt{e[k] + 1/3 R1})^2 / b1$$

$$\mu_{NL}(e[k]) = 1 - (\sqrt{e[k]})^2 / b1$$

$$\mu_{PK}(e[k]) = 1 - (\sqrt{e[k] - 1/3 R1})^2 / b1$$

$$\mu_{PS}(e[k]) = 1 - (\sqrt{e[k] - 2/3 R1})^2 / b1$$

$$\mu_{PB}(e[k]) = 1 - (\sqrt{e[k] - R1})^2 / b1$$

Dengan rata-rata  $R1$  dan sebaran  $b1 = 1/3 R1$

## 2. Perubahan Error ( $\hat{e}[k]$ )

$$\mu_{NB}(\hat{e}[k]) = 1 - (\sqrt{\hat{e}[k] + R2})^2 / b2$$

$$\mu_{NS}(\hat{e}[k]) = 1 - (\sqrt{\hat{e}[k] + 2/3 R2})^2 / b2$$

$$\mu_{NK}(\hat{e}[k]) = 1 - (\sqrt{\hat{e}[k] + 1/3 R2})^2 / b2$$

$$\mu_{NL}(\hat{e}[k]) = 1 - (\sqrt{\hat{e}[k]})^2 / b2$$

$$\mu_{PK}(\hat{e}[k]) = 1 - (\sqrt{\hat{e}[k] - 1/3 R2})^2 / b2$$

$$\mu_{PS}(\hat{e}[k]) = 1 - (\sqrt{\hat{e}[k] - 2/3 R2})^2 / b2$$

$$\mu_{PB}(\hat{e}[k]) = 1 - (\sqrt{\hat{e}[k] - R2})^2 / b2$$

Dengan rata-rata  $R2$  dan sebaran  $b2 = 1/3 R2$

## 3. Sinyal atur ( $u[k]$ )

$$\mu_{NB}(u[k]) = 1 - (\sqrt{u[k] + R3})^2 / b3$$

$$\mu_{NS}(u[k]) = 1 - (\sqrt{u[k] + 2/3 R3})^2 / b3$$

$$\mu_{NK}(u[k]) = 1 - (\sqrt{u[k] + 1/3 R3})^2 / b3$$

$$\mu_{NL}(u[k]) = 1 - (\sqrt{u[k]})^2 / b3$$

$$\mu_{PK}(u[k]) = 1 - (\sqrt{u[k]} - 1/3 R3)^2 / b3$$

$$\mu_{PS}(u[k]) = 1 - (\sqrt{u[k]} - 2/3 R3)^2 / b3$$

$$\mu_{PB}(u[k]) = 1 - (\sqrt{u[k]} - R3)^2 / b3$$

Dengan rataaan R3 dan sebaran  $b3 = 1/3 R3$

#### 4. Perubahan sinyal atur ( $\dot{u}_{pi}[k]$ )

$$\mu_{NB}(\dot{u}_{pi}[k]) = 1 - (\sqrt{\dot{u}_{pi}[k]} + R4)^2 / b4$$

$$\mu_{NS}(\dot{u}_{pi}[k]) = 1 - (\sqrt{\dot{u}_{pi}[k]} + 2/3 R4)^2 / b4$$

$$\mu_{NK}(\dot{u}_{pi}[k]) = 1 - (\sqrt{\dot{u}_{pi}[k]} + 1/3 R4)^2 / b4$$

$$\mu_{NL}(\dot{u}_{pi}[k]) = 1 - (\sqrt{\dot{u}_{pi}[k]})^2 / b4$$

$$\mu_{PK}(\dot{u}_{pi}[k]) = 1 - (\sqrt{\dot{u}_{pi}[k]} - 1/3 R4)^2 / b4$$

$$\mu_{PS}(\dot{u}_{pi}[k]) = 1 - (\sqrt{\dot{u}_{pi}[k]} - 2/3 R4)^2 / b4$$

$$\mu_{PB}(\dot{u}_{pi}[k]) = 1 - (\sqrt{\dot{u}_{pi}[k]} - R4)^2 / b4$$

Dengan rataaan R4 dan sebaran  $b4 = 1/3 R4$

##### 4.1.2.2 Penyusunan Aturan Dasar

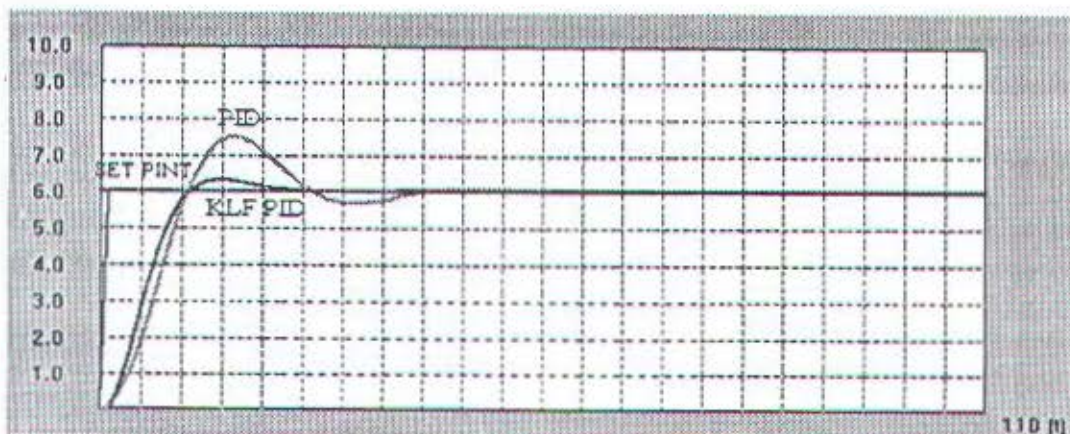
Penjelasan tentang perilaku kontrol aliran akan memberi pemahaman tentang perilaku pengaturannya. Berdasarkan pemahaman ini penurunan aturan dasar secara heuristik dapat dilakukan sebagaimana telah dijelaskan. Dari penjelasan tersebut, aturan dasar untuk kontroler PD yang akan digunakan adalah tabel keputusan MacVicar-Welan dengan 7 variabel error dan 7 variabel perubahan error, sehingga jumlah aturan kontrolnya 49 aturan dasar. Sedangkan pada kontroler PI hanya terdiri atas 7 rule. Seperti yang ditunjukkan oleh tabel 4.2.a dan 4.2.b.

- Operasi defuzzifikasi dengan metode COA untuk mendapatkan sinyal atur.
- Baca sinyal atur dan proses selanjutnya yaitu menampilkan hasil simulasi yang berupa grafik.
- Untuk mengakhiri program simulasi ini dilakukan dengan pembatasan iterasi. Pada program ini iterasi yang dilakukan sebanyak 500 kali.

#### 4.4. ANALISA HASIL SIMULASI

Hasil dari menjalankan program simulasi ini, ditunjukkan dalam bentuk grafik. Grafik sistem pengaturan kecepatan motor arus searah ditunjukkan oleh gambar 4.10. Keberhasilan perancangan suatu sistem pengatur dapat dinilai dari kinerja sistem keseluruhan. Aspek kinerja yang akan dinilai dari perancangan ini adalah :

1. tanggapan peralihan (*transient respon*)
2. keadaan tunak (*steady state*)
3. penjejakan (*tracking*).



Gambar 4.10. Hasil simulasi



Tabel 4.4. Respon transien hasil simulasi

RESPON TRANSIEN	KLF PID	PID
Waktu tunda ( td )	0.5	0.6
Waktu naik ( tr )	1.1	1.15
Waktu puncak ( tp )	1.4	1.7
Lewatan maksimum (Mp)	0.09 %	0.25 %
Waktu penetapan ( ts )	1.9	3.7

Semua analisa untuk menguji kontroler didasarkan pada data grafik dan data numerik yang merupakan hasil simulasi dan perbedaan respon transien ditunjukkan pada tabel 4.4.

Dari gambar 4.10, dapat dianalisa sebagai berikut :

- Analisa keadaan tunak dengan parameter kesalahan keadaan tunak menunjukkan bahwa kedua kontroler memberikan kinerja yang baik.
- Perbandingan kedua kontroler (KLF PID dan PID) secara teliti menunjukkan, bahwa KLF PID mempunyai :
  - KLF PID memberikan penjejakan lebih halus dibandingkan kontroler PID.
  - Sifat responsif kontroler PID menyebabkan kontroler PID sering berlebihan menanggapi perubahan kecil pada masukan, sehingga sinyal outputnya mengalami osilasi kecil disekitar harga acuannya.
  - Perbandingan kesalahan penjejakan kedua kontroler memperkuat analisa tentang kehalusan tanggapan sistem.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

---

#### 5.1. KESIMPULAN

Ditinjau dari segi perancangan dan penerapan metodologi KLF PID mempunyai kelebihan yang sama pada KLF, yaitu :

- Untuk merancang KLF PID tidak memerlukan model matematis objek atur.
- Penerapannya dapat diwujudkan dalam bentuk *look-up table*, sehingga mempunyai waktu eksekusi yang sangat kecil.
- Parameter-parameter perancangan KLF PID memungkinkan dirancangnya pengatur yang mempunyai perilaku tidak linier.

Secara umum KLF PID mempunyai keunggulan dibandingkan dengan KLF ataupun kontroler PID yaitu :

1. KLF PID tidak mempunyai kesalahan keadaan tunak dan respon time yang lebih baik daripada KLF.
2. KLF PID mempunyai respon time yang lebih baik daripada kontroler PID.

Tetapi penggunaan metodologi KLF PID juga mempunyai kelemahan, karena :

- Perancangan memerlukan pengenalan secara mendalam tentang perilaku objek atur dan perilaku pengaturannya.
- Tidak mempunyai prosedur sistematis dalam penentuan dan penalaan parameter-parameter penguatannya, sehingga memerlukan prosedur coba-coba.
- Tidak dapat dicari nilai optimal dari suatu objek atur yang diatur.

## 5.2. SARAN

Banyak hal yang menarik untuk dikaji dari perancangan dan penerapan KLF PID. Salah satu segi yang menarik adalah perilaku kontroler yang tidak linier. Sudah banyak peneliti yang menyinggung hal ini, namun jarang yang merancang secara khusus untuk kegunaan tertentu. Untuk pengembangan lebih lanjut perancangan disarankan untuk merancang secara khusus ketidaklinieran dan menerapkan pada objek atur yang tidak linier pula.



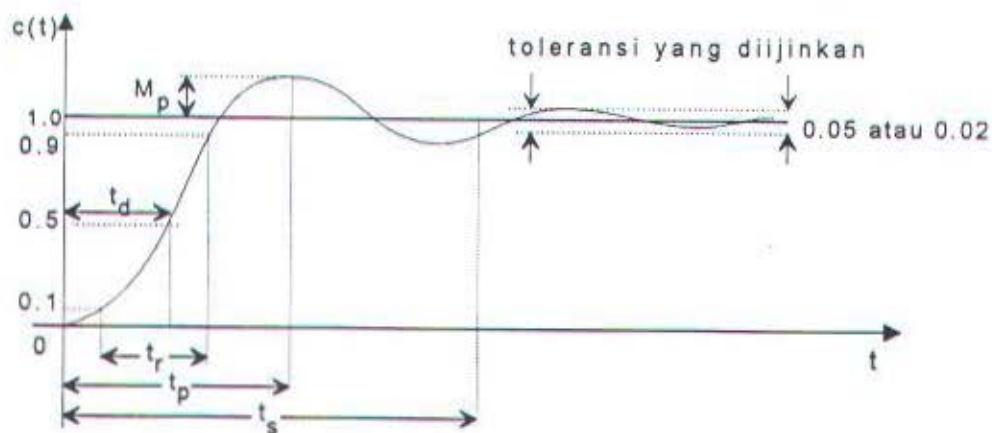
## DAFTAR PUSTAKA

---

1. Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part I", IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol. 20 No. 2, Maret/April, 1990.
2. Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part II", IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol. 20 No. 2, Maret/April, 1990.
3. C.J. Harris, C.G. Moore & M. Brown, "Intelegent Control : Aspects Of Fuzzy Logic And Neurals Nets", World Scientific, 1993.
4. Essam Amar, 'Disain Kontroler Logika Fuzzy Pada Katup Pengatur Di PLTGU Gresik', Teknik Elektro ITS, 1995.
5. Jun Yan, M. Ryan dan J. Power, 'Using Fuzzy Logic', Prentice Hall, 1948.
6. Katsuhiko Ogata, 'Modern Control Engineering', Prentice Hall, 1984.
7. Kwok L., Tang dan Robert J. Mulhaolland, "Comparing Fuzzy Logic with Classical Controller", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol. 21, No. 4, Juli/Agustus 1991.
8. Michio Sugeno, "Industrial Applications of Fuzzy Control", Elsevier Science Publishising B.V., 1985.
9. Mitsubishi Heavy Industries, 'HRSG Control Diagram', Mitsubishi Heavy Industries.
10. Sulaiman S., 'Perancangan Dan Implementasi Sistem Pengatur Eksplisit MRAC Pada Sistem Pengatur Posisi Motor DC', Teknik Elektro ITS, 1995.
11. Trihastuti Agustinah, 'Disain Kontroler Logika Fuzzy Untuk Sistem Pengaturan Posisi Modular Servo MS 150 ', Teknik Elektro ITS, 1993.

## RESPON TRANSIEN

Respon sistem terdiri dari respon transien dan respon keadaan tunak (steady state). Respon transien sistem stabil menunjukkan adanya kesetimbangan sistem pada waktu tertentu, sedangkan kesalahan keadaan tunak merupakan indikasi ketelitian respon sistem pada waktu tak terhingga.



Gambar Respon transien sistem dengan input unit step

Tanggapan peralihan suatu sistem menunjukkan kemampuan sistem untuk mencapai nilai pada keadaan tunak yang baru dalam waktu tertentu. Sistem yang baik akan memiliki waktu peralihan yang cepat. Spesifikasi perfromansi transien dapat dibuat dalam domain waktu  $t$  yang kemudian dapat ditranslasikan ke domain  $s$  atau domain  $\zeta$ . Spesifikasi transien dari suatu sistem meliputi :

- ♦ Waktu tunda (delay time)  $t_d$

Waktu tunda adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai setengah harga akhir yang pertama.

- ◆ Rise time ( $t_r$ )

Rise time merupakan waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10% sampai 90% untuk mencapai nilai akhir.

- ◆ Peak time ( $t_p$ )

Peak time adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak (overshoot) pertama kali.

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad \text{di mana: } \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

- ◆ Maksimum overshoot ( $M_p$ )

Maksimum overshoot terjadi pada waktu puncak atau pada  $t = t_p = \pi / \omega_d$ .

Hubungan antara prosen overshoot dengan koefisien rasio redaman dapat dinyatakan dengan:

$$M_p = e^{-(\zeta / \sqrt{1 - \zeta^2})\pi} \times 100\%$$

- ◆ Settling time ( $t_s$ )

Settling time adalah waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai dan menetap dalam daerah di sekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentasi mutlak dari harga akhir.

Misalnya kita pilih toleransi kesalahan 2%, sehingga:

$$t_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad \text{atau untuk kriteria kesalahan 5 \% maka } t_s = \frac{3}{\zeta \omega_n}.$$



27 FEB 1996

Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri ITS

TUGAS AKHIR - EL.1799

Nama : Imron Yuatno  
Nomor Pokok Mahasiswa : 284 220 0166  
Bidang Studi : Teknik Sistem Pengaturan  
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Katjuk Astrowulan, MSEE  
2. DR. Ir. Muhamad Nuh, DEA  
Judul Tugas Akhir : Simulasi Kontroler Fuzzy Pada Pengaturan Kecepatan Motor DC

**Uraian Tugas Akhir :**

**Kontroler fuzzy merupakan kontroler yang didasarkan pada penggunaan teori himpunan dan logika fuzzy yang berfungsi untuk merubah strategi kontrol linguistik menjadi strategi kontrol otomatis, prinsip pengendaliannya berupa rangkaian pernyataan bersyarat. Dan aturan-aturan pengendaliannya diperoleh dari identifikasi sistem fuzzy yang telah dijadikan basis pengetahuan dan disimpulkan melalui mekanisme inferensi.**

**Sistem pengaturan kecepatan motor DC pada dasarnya adalah objek atur yang sederhana ditinjau dari model matematisnya yang baku serta kemudahan dalam memperoleh harga-harga parameternya. Tugas akhir ini dititikberatkan pada perancangan sistem pengaturan kecepatan motor DC dengan kaidah atur kontroler fuzzy diturunkan secara heuristik berdasarkan pengenalan terhadap objek atur dan perilaku pengaturannya.**

Surabaya, 13 Februari 1996

Menyetujui

Dosen Pembimbing I

Ir. Katjuk Astrowulan, MSEE

Nip. 130 687 438

Jurusan Teknik Elektro - FTI  
Ketua

Dosen Pembimbing II

DR. Ir. Muhamad Nuh, DEA

Nip. 131 415 674

Mengetahui

Bidang Studi  
Teknik Sistem Pengaturan  
Koordinator

Dr. Ir. Moch. Rameli

Nip. 130 938 507



## Usulan Tugas Akhir

---

A. JUDUL : SIMULASI KONTROLER FUZZY PADA PENGATURAN KECEPATAN MOTOR DC

B. RUANG LINGKUP : 1. TEORI HIMPUNAN FUZZY  
2. SISTEM PENGATURAN DIGITAL  
3. SISTEM PAKAR  
4. INSTRUMENTASI DAN TELEMETRI

C. LATAR BELAKANG : Kontroler logika fuzzy dengan menggunakan basis pengetahuan dan ungkapan linguistik dapat merepresentasikan cara kerja operator manusia tersebut atau dengan kata lain pengaturan fuzzy terletak pada logika pengambilan keputusan yang meniru pengambilan keputusan pada manusia.

Sistem pengaturan kecepatan motor DC yang sederhana ditinjau dari model matematisnya yang baku serta kemudahannya dalam memperoleh harga-harga parameternya. Namun dengan mengenali perilaku objek atur tetap dapat dirancang suatu pengaturan tanpa mempedulikan model matematisnya.

**D. PENELAAHAN STUDI :** Aturan-aturan kontrol menggunakan himpunan fuzzy dan logika fuzzy yang dinyatakan secara linguistik sebagai dasar pembentukan basis pengetahuan pada kontroler. Perancangan sistem pengaturan kecepatan motor DC dengan kaidah atur kontroler fuzzy diturunkan secara heuristik berdasarkan pengenalan terhadap objek atur dan perilaku pengaturannya.

Hasil rancangan ini akan disimulasikan pada komputer berdasarkan data-data input sistem yang sesungguhnya, sehingga terbentuk konfigurasi sistem pengaturan logika fuzzy berbasis komputer.

**E. TUJUAN :** Mendisain suatu sistem pengaturan kecepatan yang mempunyai kinerja yang baik.

**F. RELEVANSI :** Sebagai masukan serta pengembangan lebih lanjut dalam sistem pengaturan untuk sistem yang lebih kompleks.

**G. LANGKAH-LANGKAH :**

1. Studi Literatur.
2. Pengumpulan data.
3. Analisa data dan simulasi.
4. Penyusunan Buku.



**II. JADWAL KEGIATAN :** Tugas Akhir ini direncanakan akan diselesaikan dalam jangka waktu enam bulan dengan jadwal sebagai berikut :

No.	Kegiatan	Waktu	Bulan					
			I	II	III	IV	V	VI
1	Studi Literatur							
2	Pengumpulan Data							
3	Analisa data dan simulasiAnalisa							
4	Penyusunan Buku							

## RIWAYAT HIDUP



Imron Yuatno dilahirkan di Surabaya 13 Januari 1964. Putra bungsu dari pasangan Fatimah dan Ibrahim Masdar. Bertempat tinggal di Dinoyo Tengah 42 Surabaya. Menjadi mahasiswa di Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan Jurusan Teknik Elektro FTI - ITS Surabaya pada tahun 1984 sampai sekarang.

### Riwayat Pendidikan :

- SD Dorowati Surabaya lulus pada tahun 1977
- SMP Negeri 6 Surabaya lulus pada tahun 1981
- SMA Negeri 9 Surabaya lulus pada tahun 1984.

Pada bulan Maret tahun 1996 mengikuti seminar dan ujian Tugas Akhir di Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro.